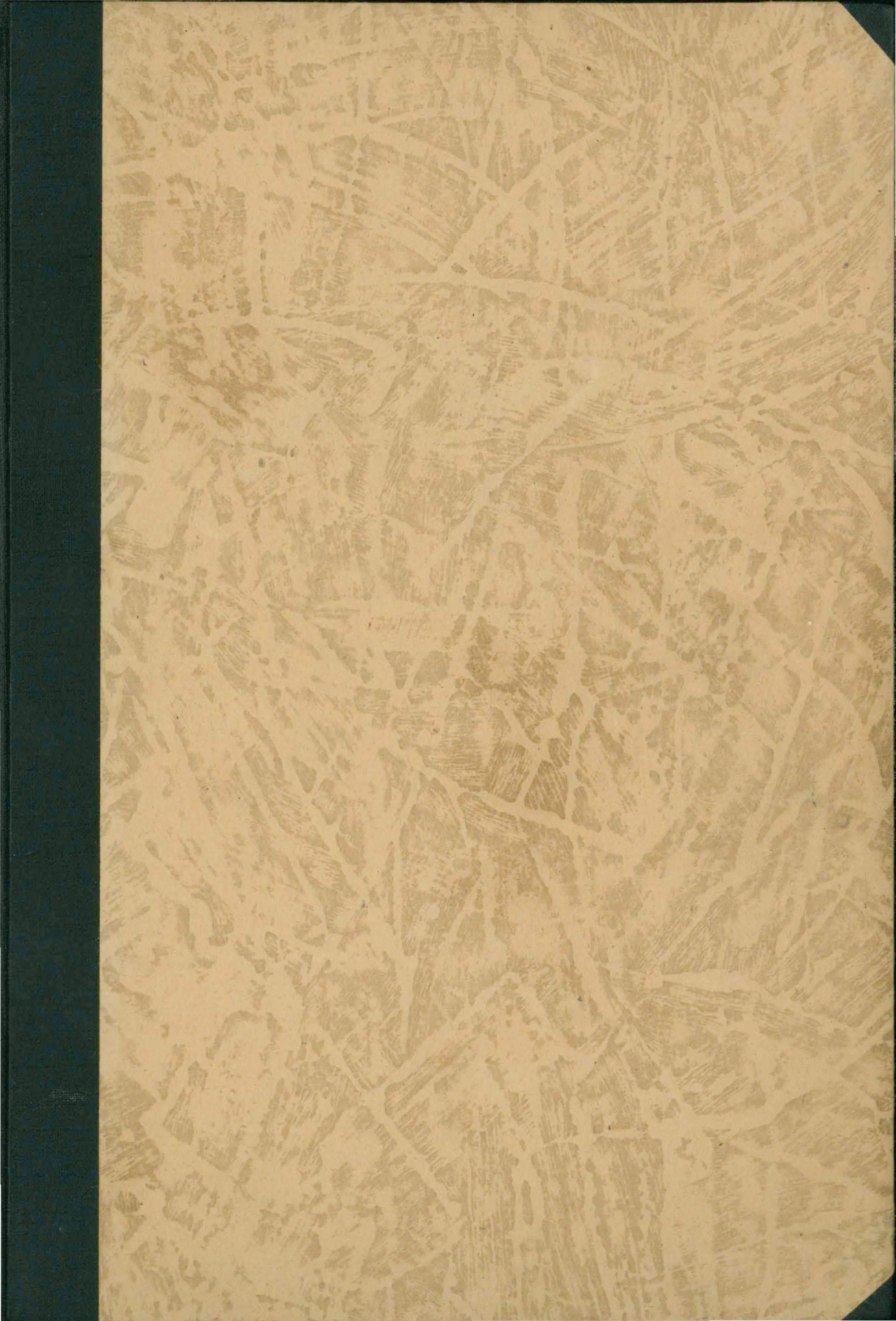


Philipp Lenard

Deutsche Physik

3. Band

Jürgen Wehrhahn

Deutsche Physik

in vier Bänden

Von

Philipp Lenard

in Heidelberg

Erster Band: Einleitung und Mechanik
Zweiter Band: Akustik und Wärmelehre
Dritter Band: Optik und Elektrizitätslehre 1. Teil
Vierter Band: Elektrizitätslehre 2. Teil



J. F. Lehmanns Verlag / München-Berlin

Deutsche Physik

in vier Bänden

Von

Philipp Lenard

in Heidelberg

Allen, die in wohlgegründeter Naturerkenntnis ihre geistige Ruhe suchen, zur Freude geschrieben.

Dritter Band:

Optik, Elektrostatik und Anfänge der Elektrodynamik

Mit 115 Abbildungen

Dritte, vermehrte Auflage



J. F. Lehmanns Verlag / München-Berlin 1943

Druck von Dr. F. P. Datterer & Cie., Freising-München.
Printed in Germany.

Inhalt des dritten Bandes.

Seite

Optik oder die Lehre vom Licht.

Einleitung zur Physik des Äthers 3
Licht und Lichtempfindung. Der Äther. Lichtwellen und ihre Darstellung durch Kraftlinien. Definition des Äthers.

I. Geometrische Optik 8

a) Geradlinige Ausbreitung 8
Schatten. Lichtstrahlen und Strahlenbündel. Lochkammer. Optische Bilder. Reelle und virtuelle Bilder. Lichtintensität und Beleuchtungsstärke. Intensitätsabnahme bei freier Ausbreitung. Photometrie. Gültigkeitsgrenzen der Geradlinigkeit.

b) Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes 13
Messung im Sonnensystem. Beobachtungen in irdischen Abständen. Lichtgeschwindigkeit gut gesichert. Stets bezogen auf den Äther. Der Äther nicht einheitlich. Aberration; eine Erscheinung der Relativbewegung des Beobachters zum Lichtstrahl, nicht zur Lichtquelle. Beobachtungen an Doppelsonnen. Tägliche Aberration. Uräther. Keine Querbewegung vom Äther der Erde. Lichter irdischer Quellen zeigen keine Aberration. Lichtverspätungen im Himmelsraum.

c) Zurückwerfung (Reflexion) des Lichtes 22
Reflexionsgesetz. Bilder ebener Spiegel. Gekrümmte Spiegel. Rauhe Grenzflächen.

d) Brechung des Lichtes 26
Brechungsgesetz. Brechungsexponent. Totale Reflexion. Menge des reflektierten Lichtes.

e) Erklärung der Reflexion und der Brechung von Wellen 29
Huygens' Prinzip. Wellenfront oder Wellenfläche. Erläuterungsbeispiel und Beweis. Reflexion von Wellen. Brechung von Wellen. Brechungsexponent als Verhältnis der Ausbreitungsgeschwindigkeiten.

f) Die Farben des Lichtes 33
Lichtbrechung in Prismen. Farbiges Licht, Farbenempfindungen, Farbstoffe. Spektrum. Weißes Licht. Einfarbiges (monochromatisches) Licht. Reines Spektrum. Der Regenbogen. Natur der monochromatischen Lichter und Ursache ihrer verschiedenen Brechbarkeit. Farbeneigentümlichkeiten des Auges. Wirkung gefärbter Körper. Farbstoffgemische. Farbendruck, Farbenphotographie.

g) Linsen und optische Geräte 43
Strahlenlauf in einer Sammellinse. Kugelfehler. Farbfehler. Brennpunkt, Brennweite. Gegenstandsweite und Bildweite. Reelle und virtuelle Linsenbilder. Stellung und Größe der Linsenbilder. Auge und Lichtbildkammer. Keplers Fernrohr, Lupe. Galileis Fernrohr. Vorzüge von Keplers Fernrohr. Vergrößerungszahl eines Fernrohres. Mikroskop. Grenze der Verwertung stärkster Mikroskopvergrößerungen. Spektralapparat. Beseitigung der Linsenfehler. Linsensysteme. Schlieren.

II. Atomoptik 58
Zusammenwirken von Licht und Materie.

a) Lichtaussendung (Emission) heißer Körper 58
Unterscheidung nach dem Aggregatzustand. Leuchtende Gase. Flammenspektren. Spektralanalyse. Eigenschwingungsdauern der Atome. Dichte Gase, flüssige und feste Körper. Vor Störungen geschützte Wellenaussendungen. Spektralserien. Serienformeln.

Seite

b) Lichtabsorption 64
Absorptionsspektren. Absorption von Wellenstrahlen Folge des Mitschwingens beweglicher Teile. Störungen der Eigenschwingungen. Absorptionsspektralanalyse. Dispersionstheorie (Theorie der Farbenzerstreuung). Zusammenhang der Absorption mit der Emission. Atome als Oszillatoren und Resonatoren. Spektralanalyse der Gestirne.

c) Wirkungen absorbierten Lichtes 71
Wärmewirkungen des Lichtes 72
Chemische Wirkungen des Lichtes 72
Bleichen von Farbstoffen. Lichtwirkung auf das Blattgrün; chemische Wirkung abgesondert von der Lichtabsorption. Silbersalze, Lichtbildnerei. Chemische Wirkung den elektrischen Kräften des Lichtes zugehörig. Ultraviolett. Salzsäurebildung aus Chlor und Wasserstoff. Ozonbildung aus Sauerstoff. Physiologische Wirkungen des Lichtes.

d) Kaltes Leuchten 78
Fluoreszenz 78
Fluoreszierende Flüssigkeiten, feste Körper und Gase. Stokes' Regel. Spektrale Zusammensetzung des Fluoreszenzlichtes. Linienfluoreszenzen bei Hochfrequenzstrahlen. Quantenmäßiges Arbeiten der Atome. Resonanzstrahlung.
Phosphoreszenz 81
Erdalkalisulfidphosphore. Phosphoreszenzzentren. Emissionsbanden. Erregungsverteilung. Erregende Absorption. Nachweis der elektrischen Resonanz bei der Absorption. Große absorbierende Querschnitte. Einfluß der Temperatur. Aufspeicherung der Erregung. Lichtemission und deren Erregung. Ausleuchtung und Tilgung der Phosphore. Kurzdauernde Phosphoreszenzen. Reinstoffphosphore und Fremdstoffphosphore.
Kaltes Leuchten bei chemischen Umsetzungen 88
Molekular-lokal hohe Temperaturen. Leuchten der Lebewesen.

III. Wellenoptik 90

a) Interferenzerscheinungen 90
Gangunterschiede und Unterschiede von Wellenzahlen aus verschiedenen Ursachen.
Farben dünner Blättchen 92
Erscheinungen bei weißem Licht und bei einfarbigem Licht. Erklärung der Ringe. Dunkelheit der Mitte. Wellenlängenmessung aus den Ringen. Erklärung der Farben im weißen Licht. Dicke Schichten; kohärentes Licht.
Interferenzen an Platten im durchgehenden Licht 100
Fresnels Spiegelversuch 101
Ein reiner Interferenzversuch. Fresnelsche Lupe. Nachweisbare Wellenfronten.
Studien über Lichtgeschwindigkeit und Äther mittels Interferenz 103
Interferenzrefraktor. Optische Mitführung. Bei kleinen Körpern nur der Erdäther merklich; keine Mitführung desselben durch bewegte Körper. Quer-Mitnahme der Lichtstrahlen in bewegten Körpern. Der Äther in der Umgebung der Erde an ihr ruhend. Äther und Drehbewegung.

b) Beugung 110
Allgemeines 110
Überlegung nach Huygens' Prinzip. Interferenzen der Einzelwellen. Freie Wellenfront. Beugung um die Kante eines Schirmes. Schirm mit Öffnung. Nadelschatten. Allgemeine Berechnungsweise von Beugungserscheinungen. Beobachtungsweisen.
Zwei Öffnungen 114
Einfache Herleitung des Beugungsbildes. Vergleichung mit Fresnels Spiegelversuch. Winkelabstände der Streifen. Grenzen der Leistungsfähigkeit der Mikroskope. Wellenlängenmessung. Beugungsspektrum. Fixsternbeobachtungen.

Seite

Gitter 119
Gitterspektren. Erscheinungen bei nicht engen Gitterspalten. Gitterspektroskopie. Verfeinerte Interferenzspektroskopie. Sonstige Beugungserscheinungen. Kristallspektroskopie. Größe der Wellenfronten.

Energiewegweisung 125
Interferenz und Energiegesetz. Interferenz als Energiewegweiser auch bei Licht. Scheinbarer Widerspruch mit dem Energiegesetz. Interferenz als Energiewegweis in den Lichtquellen; gruppenweises Zusammenwirken der Atome.

c) Polarisation 128
Längs- und Quer-Wellen. Polarisiertes Licht. Nachweisung polarisierten Lichtes. Schwingungsebene. Unpolarisiertes Licht. Teilweise polarisiertes Licht. Polarisation durch Spiegelung. Der Spiegel als Polarisator und Analysator. Polarisation des gebrochenen Lichtes. Plattensatz. Berechnung der Polarisationen bei Reflexion und Brechung.

d) Kristalloptik 134

Doppelbrechung 134
Kristalle. Kristallsysteme. Die Doppelbrechung. Ordentlicher und außerordentlicher Strahl. Optische Achse. Polarisation bei der Doppelbrechung. Hauptschnitt. Spate als Polarisatoren und Analysatoren. Turmalinzange. Erklärung der Doppelbrechung. Körper ohne Doppelbrechung und einachsige Kristalle. Wellenflächen der einachsigen und der zweiachsigen Kristalle. Einzelfälle der Doppelbrechung.

Erscheinungen an Kristallplatten im polarisierten Licht 142
Gangunterschiede durch Doppelbrechung. Kristallplatte zwischen parallelen Spaten. Gipskeil; Erscheinungen im weißen Licht. Zirkular und elliptisch polarisiertes Licht. Beobachtungsweise mit parallelem polarisierten Licht. Kristallplatten in konvergentem polarisierten Licht. Beispielsfall. Beobachtungsweise mit konvergentem polarisierten Licht. Andere Erscheinungen in konvergentem Licht. Doppelbrechung in nicht kristallisierten Körpern.

e) Drehung der Polarisationsebene 149

Erster Teil der Lehre von der Elektrizität: Elektrostatik und Anfänge der Elektrodynamik.

Übersicht 153

I. Elektrostatik oder Kenntnisse von der ruhenden Elektrizität 155

a) Grundkenntnisse 155
Die Elektrizität. Die elektrischen Kräfte. Leiter und Nichtleiter, Isolation. Elektrische Abstoßung. Elektroskope. Zwei Elektrizitäten. Gegenseitige Neutralisation und Bindung der beiden Elektrizitäten. Alle Körper enthalten Unmengen von beiden Elektrizitäten. Freie Elektrizität. Keine Erzeugung von Elektrizität. Unbestimmtheit der Elektrizitätsbewegungen. Artunterschiede der beiden Elektrizitäten; Elektronen. Metallische Leiter. Coulomb's Gesetz. Einheiten für Elektrizitätsmengen.

b) Verstehen der Erscheinungen nach Coulombs Gesetz 164

Influenz 164
Kräfte elektrischer Ladung auf unelektrische Körper. Dielektrische Verschiebungen. Influenzverteilung auf Leitern. Ladung durch Influenz. Trennung der influenzierten Elektrizitäten. Elektrophor. Energiegesetz gewahrt. Influenzmaschine.

Seite

Elektrische Spannung 168
Spannungszustand. Elektroskope und Funken als Spannungsanzeiger. Eigenschaften des elektrischen Funkens. Spannung an Leitern. Analogie mit Gasdruck. Maß der Spannung. Nur Spannungsunterschiede sind wahrnehmbar. Spannungsbemessung durch die Arbeit unabhängig von der Wahl des Weges. Spannungseinheit. Spannungsmessung. Idiostatische und heterostatische Elektrometer. Eichung in Volt.

Verteilung der freien Elektrizität auf Leitern 174
Sie sitzt in Ruhe nur an der Oberfläche. Kugelförmiger Leiter. Besonderer Nachweis von Coulombs Gesetz. Im Inneren eines hohlen, geladenen Leiters wirken keine Kräfte. Elektrostatischer Schutz. Blitzschutz. Dicke der Ladungsschicht an der Oberfläche. Teilweise und vollständige Entladung eines Leiters an einen anderen. Kapazität. Größe der äußeren Oberfläche wesentlich. Kapazitätseinheit. Flächendichte der Elektrizität. Kräfte an der Oberfläche geladener Leiter. Verhalten der Elektrizität an Leiteroberflächen. Krümmung maßgebend für die Oberflächendichte. Untersuchung der Flächendichte. Spitzenwirkung.

c) Verstehen der Erscheinungen durch die Kraftlinien 182

Einführung der Kraftlinien 182
Schwierigkeiten der Anwendung von Coulombs Gesetz. Rechenmethoden, die wenig mit der Natur zu tun haben. Umfassende Bedeutung der Kraftlinien. Übersicht zur Elektrostatik und Elektrodynamik; zweierlei Kraftlinien. Grenzen im Inneren der Atome.

Die elektrischen Kraftlinien und ihre Eigenschaften 185
Elektrische Kraft. Das elektrische Feld. Elektrische Kraftlinien. Darstellung der Größe der elektrischen Kräfte durch die Kraftlinien. Anfang und Ende jeder Kraftlinie nur dort, wo die beiden entgegengesetzten Elektrizitäten sitzen. Keine Fortsetzung der Kraftlinien ins Innere von Leitern bei ruhender Elektrizität; sie enden stets senkrecht an den Leiteroberflächen. Niemals schneiden einander zwei Kraftlinien. Größe der Normalkraft an der Leiteroberfläche proportional der elektrischen Flächendichte. Zu jedem Kraftlinienende gehört eine bestimmte Elektrizitätsmenge. Paarweises Vorhandensein der Elektrizitäten. Bedeutung der Erdableitung. Kraftlinien bei Influenz. Herstellung von Kraftlinienbildern. Kraftlinien geformt und angeordnet wie gespannte Fäden, die einander seitlich drängen. Feld des Plattenkondensators. Bewegungen von Kraftlinien mit und an Leitern. Umgruppierung von Kraftlinien.

Auf Leiter ausgeübte Kräfte 195
Alle Kräfte im elektrischen Feld durch Zug und Drängen der Kraftlinien bewirkt. Kraftlinien formen sich nicht nur wie gespannte einander drängende Fäden, sondern sie wirken auch als solche Fäden. Zug jeder Kraftlinie nicht einheitlich, sondern an jeder Stelle proportional der Dichte der Kraftlinien. Zug und Drängen stets einander proportional. Elektrischer Druck.

Kraftlinien und elektrische Spannung 198
Spannung aus Dichte und Länge der Kraftlinien ersichtlich. Entladung von Leitern. Spannungsverteilung im Raum. Spannungsgefälle. Elektromagnetische Einheit der Feldstärke. Flächen gleicher Spannung. Tropfsammler, Flammensammler. Erdspannungsgefälle. Spannung ohne Kraftlinien ist Nichts. Absolute Messung hoher Spannungen. Kapazität neu betrachtet; sie sitzt im elektrischen Felde. Kapazitätsnormalen.

Neue Erfahrungen 204
Einfluß des Stoffes im elektrischen Feld auf die Kapazität. Dielektrikum. Dielektrizitätskonstante. Zug und seitliches Drängen der Kraftlinien im Dielektrikum vermindert. Kräfte bei konstanter Ladung und bei konstanter Spannung. Elektrisches Feld im Dielektrikum. Kraftlinienlauf bei teilweiser Erfüllung des Feldes mit dielektrischen Körpern. Auf Nichtleiter ausgeübte

Seite

Kräfte. Vorgänge im Inneren des Dielektrikums. Rückstandsbildung. Kleistsche Flasche. Durchschlagsfestigkeit. Aufhäufung großer Elektrizitätsmengen und Energiewirkungen bei deren Entladung.

Elektrische Energie 211

Kleistsche Flasche als Beispiel. Berechnung elektrischer Energie. Einheiten. Sitz der elektrischen Energie. Energiedichte. Energie einer Kraftlinie. Energiewanderungen mit den Kraftlinien. Geschwindigkeit des Entlanggleitens von Kraftlinien an Leitern. Energiewanderungen in die Kraftlinien. Berechnung von Kräften aus der Energie des Feldes. Die Kraftlinien als Linien der Energieverteilung im Äther; ihre Eigenschaften sind Energieeigenschaften. Innere Beschaffenheit der Energie angezeigt.

II. Anfänge der Elektrodynamik, d. i. der Kenntnisse von der bewegten Elektrizität 220

a) Neue Mittel 220

Voltas Grundversuch. Bestimmtheit der Spannung. Berührung verschiedener Körper stets elektromotorisch wirksam; elektrische Doppelschicht. Spannungen und Ladungen bei Berührung von Nichtleitern und von Leitern. Wasserfallelektrizität. Elektrische Natur der Molekularkräfte. Spannungsreihe. Leiter I. Klasse. Verhalten der Atome gegen Elektronen nach der Spannungsreihe. Leiter II. Klasse passen nicht in die Spannungsreihe. Die Säule und ihre Elemente. Große Mengenergiebigkeit. Zum Kreise geschlossenes Element. Andere Formen der Elemente. Sitz der Spannung in den Elementen.

b) Allgemeine Kenntnisse über elektrische Ströme 229

Die Spannungen in der Kette der Elemente. Der elektrische Strom. Ursprung der Spannung in den Elementen. Stromstärke, Stromeinheit. Wirkungen elektrischer Ströme. Strommessung; Galvanometer. Ohms Gesetz. Gesetzmäßigkeiten des Widerstandes. Innerer und äußerer Widerstand. Widerstandseinheit. Widerstandsmessung in einfachem Stromkreis. Spannungsverteilung am Stromleiter. Elektrische Kraftlinien bei Strom. Ohms Gesetz für jeden Teil des Leiterkreises gültig. Dynamische Spannungsmessung. Widerstandsmessung mit Strom- und Spannungsmesser. Einfache Stromverzweigung. Widerstandsmeßbrücke. Temperaturabhängigkeit der Widerstände. Beliebig verzweigte Stromleitungen; flächenhafte und körperliche Leiter.

c) Chemische Wirkungen elektrischer Ströme 246

Erste Beobachtungen. Benennungen. Einfachste Elektrolysen. Abgeschiedene Mengen; Faradays erstes Gesetz der Elektrolyse. Voltameter. Chemische und technische Anwendungen. Sekundäre chemische Vorgänge an den Elektroden; katalytische Wirkung. Elektrische Ladungen in den Molekülen; die Jonen. Chemische Kräfte als elektrische Kräfte. Valenzelektronen. Zusammenhang mit der Spannungsreihe. Elektrolytische Dissoziation. Der elektrische Strom in den Elektrolyten. Physiologische Wirkungen der Elektrizität. Chemisch gleichwertige Abscheidungen; Faradays zweites Gesetz der Elektrolyse. Jonenladungen und Valenzen der Atome. Das elektrische Elementarquant. Berechnung der Größe des Elementarquants aus den Angaben der kinetischen Gastheorie. Verfeinerte Ermittelung und Sicherung des Elementarquants. Wanderungsgeschwindigkeiten der Jonen. Leitvermögen der Elektrolyten. Beschaffenheit der Jonen. Lösungsmoleküle; Bildungsweise der Jonen. Abhängigkeiten des Leitvermögens der Elektrolyten; Dissoziationsgrad. Der Elektrizitäts-Austausch an den Elektroden; Zersetzungsspannung; thermische und elektrolytische Dissoziation. Elektrolytische Polarisation. Metallauflösung in wässerigen Säuren. Jonenverdrängung nach Maßgabe der Spannungsreihe. Wirkungsweise von Voltas Element. Chemische Energie als Ursprung der Stromenergie. Berechnung der elektromotorischen Kraft des Voltaelements durch das Energiegesetz. Chemische Energie betrachtet als elektrische Energie. Chemische Energie als Teil der elektrischen Gesamtenergie der Atome. Konstante Elemente. Akkumulator.

Seite

d) Wärmewirkungen elektrischer Ströme 278
Stromwärme. Stromwärmegesetz. Der Begriff Strom gesichert festgehalten. Übereinstimmung mit dem Energiegesetz. Elektrische Leistung. Verteilung der Wärme im Stromkreis. Der elektrische Bogen. Hitzdraht-Strom- und Spannungsmesser. Vorgänge bei der Wärmewirkung der Ströme.

Thermoelektrische Wirkung 284
Grundversuch. Thermoelement, Thermosäule. Thermoelektrische Wirkung und Spannungsreihe. Anwendungen zu Temperaturmessung und Strahlungsmessung. Thermoelemente als Stromquellen; Übereinstimmung mit dem Energiegesetz. Thermosäule und zweiter Hauptsatz der Thermodynamik.

Anhang. E I. Zur Benennung der elektrischen Stromeinheit 291

Bei den in allen vier Bänden zahlreichen, meist in Klammern gesetzten Hinweisen bedeutet:

M = Mechanik (Bd. I),
A = Akustik (Bd. II),
W = Wärmelehre (Bd. II),
O = Optik (Bd. III),
E = Elektrizitätslehre (Bde. III und IV).

Die Zahlen bedeuten stets Absatznummern. Hinweise ohne Buchstaben beziehen sich auf denselben Teil.

Im Nachschlageverzeichnis des 4. Bandes der 2. Auflage bleiben die Seitenzahlen für die Benutzer dieses vorliegenden Bandes (3. Aufl.) bis S. 56 großenteils gültig; von S. 57 an sind sie um 1, von S. 88 an um 2 zu erhöhen.

Optik

oder

die Lehre vom Licht.

Einleitung zur Physik des Äthers.

Die Optik war das Eingangstor zur Erkenntnis des Äthers. Deshalb stellen wir sie der mit diesem Band beginnenden Hälfte der Physik voran, die man auch „Physik des Äthers" nennt (Einl. 5, Bd. I). Die Untersuchung der Erscheinungen des Lichtes hat es gezeigt, daß auch in Räumen, die frei sind von Materie, noch immer ein Etwas ist, das mitwirkt im Getriebe der Natur. Wir werden das alsbald erläutern.

1. Licht. — Vorerst ist es nötig, sich darüber klar zu sein, was wir unter „Licht" verstehen wollen: Das, was von der Sonne und von den künstlichen Lichtquellen ausgeht, was dann den Raum durchzieht und was — wenn es schließlich in die Pupille eines Auges gelangt — die „Lichtempfindung" hervorruft, durch welche es für uns zur Wahrnehmung gelangt: Dieses Etwas ist es, was wir als „Licht" untersuchen werden. Licht und Lichtempfindung dürfen ebensowenig verwechselt werden wie Schall und Schallempfindung (A 1). Licht ist — wie der Schall — ein Raumvorgang, für dessen Wahrnehmung und Untersuchung wir mit einem besonderen Sinnesorgan begabt sind, der aber auch dann vorhanden wäre und ablaufen würde, wenn wahrnehmende Sinnesorgane gar nicht vorhanden wären, so wie er im fernen Himmelsraum tatsächlich ohne solche abläuft.

Wir haben hier vieles vorauszuschicken — um sogleich brauchbare Belehrung zu geben —, was man über diesen Raumvorgang bereits mit Sicherheit in Erfahrung gebracht hat und was weiter daraus zu schließen war, wozu die eingehenden Nachweise später folgen[1]).

2. Der Äther. — Gewöhnlich auf Erden läuft das Licht in Luft. Schon Guericke fragte aber, ob die Luft zur Ausbreitung des Lichtes erforderlich sei, oder ob vielleicht auch der „leere Raum" genügte. Er ging an die Beantwortung der Frage zu einer Zeit, da man noch nicht wußte, wie weit die Lufthülle der Erde in den Himmelsraum sich erstreckt und ob dieser, den das Licht der Sonne und der anderen Gestirne ungehindert durchzieht, Luft enthält oder ob nicht. Er untersuchte daher das Licht mit seiner Luftpumpe. Er fand, daß alle Gegenstände in einem ausgepumpten Glasgefäß ganz ebenso gut zu sehen waren wie im lufterfüllten Gefäß; das Tageslicht ging also ins Innere des Gefäßes, erreichte dort ohne Luft alle Gegenstände und kam ebenso von diesen wieder heraus ins Auge, wodurch eben die im Gefäß befindlichen Gegenstände sichtbar werden. Daraus folgt, daß das Licht jedenfalls nicht wesentlich ein Vorgang

[1]) Die Haupt-Nachweisstellen finden sich in den folgenden Abschnitten (2—4) eingeklammert angegeben; im übrigen ist die ganze Optik und Elektrizitätslehre erfüllt von zusätzlichen Nachweisen des hier Vorauszuschickenden.

in der Luft ist — im Gegensatz zum Schall —, ja überhaupt kein Vorgang, zu dessen Ausbreitung Materie in irgend einer Form notwendig wäre.

Die weitere Frage, welcher Art Vorgang das Licht dann überhaupt sei, blieb lange ungeklärt. Huygens war der erste, der nach Erwägung von allem damals (1676) über das Licht Bekannten, und mit Hinzunahme seiner eigenen Forschungen, gute Gründe für den Gedanken fand, daß das Licht ein Wellenvorgang sei. Hiervon ausgehend mußte er schließen, daß dann im luftleeren Raum, in dem sehr gut Licht laufen kann, noch immer etwas sein müsse, das Wellen machen oder tragen und mit jener damals schon bekannten, bestimmten Geschwindigkeit (19) laufen lassen kann, und eben dieses Etwas nannte er „Äther". Dies ist der Ursprung der Kenntnis vom Dasein des Äthers.

Jede Geschwindigkeitsangabe hat überhaupt nur Sinn und feste Bedeutung, wenn der Vergleichsgegenstand angegeben wird, relativ zu dem sie gelte (M 42). Die Geschwindigkeit eines Fahrzeuges gilt relativ zum Erdboden, die Schallgeschwindigkeit gilt relativ zur Luft; auch die Lichtgeschwindigkeit muß, um sinnvoll zu sein, einen Bezugsgegenstand haben. Materiell kann derselbe nicht sein, weil die Ausbreitung des Lichtes auch im materiefreien Himmelsraum ihre bestimmte Geschwindigkeit einhält und zwar unabhängig von Bewegungen der Lichtquelle (25, 26) und des Beobachtungsortes (den das Licht überhaupt erst nach geschehener Ausbreitung erreicht). Es muß demnach etwas im Himmelsraum sein, was diese Geschwindigkeit regelt, was die Einhaltung ihrer bestimmten Größe bewirkt. Dies ist der Nachweis vom Dasein des Äthers, und darauf gründen wir auch seine Definition (4).

Die damals schon mit guter Begründung versuchte Annahme von der Wellennatur des Lichtes hat sich durch eine große Fülle weiter beigebrachter Erfahrung, die einen wesentlichen Teil der Optik bildet (120 u. f.), vollkommen bewahrheitet. Bedenken, die lange vorhanden waren, da Widersprüche mit Beobachtetem aufzutreten schienen (s. 176 und Note dort), entfielen mit fortschreitender Erkenntnis, und nichts steht besser fest, als daß das Licht ein Wellenvorgang ist[1]). Viele Einzelheiten sind heute über die Wellen des Lichtes in und außerhalb von Materie ermittelt. Deshalb ist auch der von Huygens zuerst mit der bestimmten Eigenschaft des Lichtwellen-Tragens gedachte Äther ein Stück erkannter Natur. Er muß in allem Raum sein, der Licht trägt, so auch im weiten Himmelsraum. Die in Gestalt der Gestirne in den Raum gestreute Materie erscheint winzig wenig gegenüber der Allverbreitung des Äthers.

Es war nicht leicht, dem Äther weiter beizukommen. Er ist auch heute noch voll von Unbekanntem. Vielleicht gleicht der gegenwärtige Zustand der Kenntnis vom Äther dem von der Luft vor Guerickes Zeiten. Die Luft erschien damals in unbestimmter Weise etwa als die Summe der Ausdünstungen aller festen und flüssigen Körper der Erde. Guericke ergründete zuerst bestimmte Eigenschaften dieses unbestimmten — aber doch daseienden — Etwas, das er mit der Pumpe greifbar gemacht hatte; die späteren Entdeckungen der vielen

[1]) Es sei sogleich hinzugefügt, daß man anderes als die Wellen im Lichte nicht gefunden hat (161, 165).

anderen „Gase" und dann auch der Bestandteile der Luft, weiter das Gelingen ihrer Verflüssigung und vieles Fernere haben die Luft schrittweise zu dem jetzt sehr bekannten und vertrauten Gegenstand gemacht. Auch die Kenntnis vom Äther wird noch ihre Entwicklung haben, und ein Anfang davon ist schon zu sehen, gegeben durch Tatsachen, die ohne Gedanken über den Äther ganz unverständlich blieben. Wir werden indessen nicht mehr vom Äther sagen, als was den verschiedenen heute bekannten Tatsachen entspricht, die wir der Reihe nach vorzubringen haben werden, und was auf dem Wege, diese Tatsachen in Zusammenhang mit allem sonst Bekannten zu begreifen, zu schließen ist. Die Tatsachen selbst sind dabei, wie immer, die Hauptsache; die Gedanken über Eigenschaften des Äthers sollen vor allem helfen, die Tatsachen besser vor Augen zu halten in Erwartung des Hinzukommens weiterer, neu zu findender Tatsachen, die immer noch Unerwartetes bringen können.

3. Lichtwellen. — Um über Licht, seine Wellen und den Äther schon von vornherein zutreffend reden zu können, mit Ausschließung der Gefahr von Unwahrheit im Wortausdruck, die auch das Denken verfälscht, ist hier schon vieles von der gesicherten Gesamtkenntnis über das Licht einzuführen, wovon die Begründung erst im Laufe der Optik und der Elektrizitätslehre erfolgen wird.

Es ist durch eingehendes Studium der elektrischen Erscheinungen genügend sicher festgestellt, daß die Lichtwellen elektromagnetische Wellen sind (E 300, 430) von derselben Art, wie sie im drahtlosen Nachrichtenwesen benutzt werden, doch sehr viel kürzer. Stellt Abb. 1 einen in Richtung des horizontalen

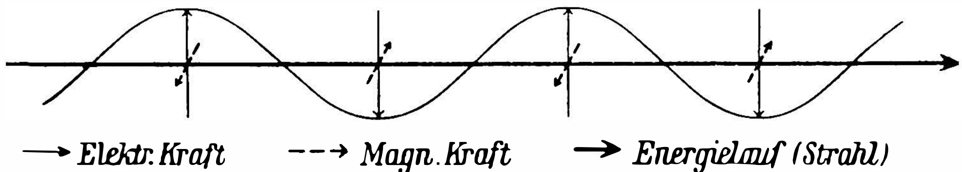


Abb. 1. Lichtstrahl.

Pfeiles laufenden Lichtstrahl dar, so kann man in seiner Länge die Lichtwellen mit Bergen und Tälern zeichnen, in übertragener Darstellungsweise, wie bei den Schallwellen (A 18). Von Berg zu Berg oder Tal zu Tal ist je eine Wellenlänge (in der Abbildung etwa 100 000fach vergrößert). Während aber bei Schallwellen die Berge und Täler Verdichtung und Verdünnung der Luft bedeuten, bedeuten bei der Lichtwelle die Berge und Täler Anwesenheit elektrischer Kräfte von abwechselnd entgegengesetzten Richtungen, wie es die senkrechten Pfeile in der Abbildung anzeigen. Gleichzeitig sind an den Bergen und Tälern auch magnetische Kräfte ebenfalls wechselnder Richtung vorhanden, wie es die perspektivisch (gestrichelt) gezeichneten, zum Strahl und zur elektrischen Kraft senkrecht stehenden Pfeile anzeigen. An den Nullpunkten, wo weder Berg noch Tal ist, fehlen alle Kräfte. Die Wellenlinie zeigt somit die Verteilung der beiden Kraftarten längs des Strahles an. Das Vorhandensein elektrischer Kraft an irgendeiner Stelle des Raumes bedeutet gewöhnliche, mechanische Kraft

(M 62) auf dort befindliche Elektrizität (E 64). Läuft also eine Lichtwelle an positiver Elektrizität vorbei, so wird dieselbe abwechselnd von Berg und Tal der Welle getroffen und somit im Takt der Welle hin- und hergeschüttelt. Negative Elektrizität erfährt stets dieselben Kräfte, wie positive, nur von entgegengesetzter Richtung (E 16, 17). Diese periodisch wechselnden Kräfte auf die beiden Elektrizitäten sind das Wesentlichste bei den Wirkungen der Lichtwellen, sowie auch aller elektromagnetischen Wellen, auf die aus den beiden Elektrizitäten aufgebaute Materie (E 520 u. f.). Wir werden in der ganzen Optik kaum mehr als dies von den elektrischen Eigenschaften der Lichtwellen zu denken brauchen, weil die mit dem Auge zu beobachtenden Erscheinungen des Lichtes unmittelbar auch mehr nicht zeigen; aber schon die hierher gehörigen Erscheinungen (88, 92 u. f., 187) geben, mit Hinzunahme der Kenntnis von den Atomen, deutliche Zeichen von der elektrischen Natur der Lichtwellen.

4. Weiteres vom Äther. — Für den Äther, als Träger der so nach aller Kenntnis beschriebenen Wellen, entsteht die Frage, wie er an der Fortpflanzung dieser Wellen beteiligt sei. Ein Seil ist an der Fortpflanzung von Seilwellen (A 4) auf ihm beteiligt durch Hin- und Herschwingen seiner Teile; die dabei im Seil wirkenden Kräfte und die Trägheit des Seiles treiben die Wellen fort (A 7). Wollte man Ähnliches vom Äther für die Lichtwellen denken, so wären dieselben hin- und herschwingender Äther; Berge und Täler der Welle wären Ätherverschiebungen. Da aber die Lichtwellen elektromagnetische Wellen sind, wie beschrieben, müßte verschobener Äther gleichbedeutend sein mit elektrischer Kraft am Orte der Verschiebung; es müßten elektrische und magnetische Kräfte überhaupt durch Ätherverschiebungen oder vielleicht durch sonstige Bewegungsvorgänge im Äther bedingt sein. Dieser Gedanke ist ausgiebig verfolgt worden; aber kein erdachter Äthermechanismus vermochte der fortschreitenden Gesamtkenntnis von den elektrischen und magnetischen Erscheinungen und auch vom Lichte zu genügen (s. M 394, Anh. M V, 5 u. 6; E 129, Anh. E V b, 8).

Der Äther scheint etwas viel Feineres zu sein — Analogien mit der Materie viel fernerstehend —, als man anfangs dachte. Es geht jedenfalls nicht an — um wahr zu sein —, weiterhin noch von „Verschiebungen" des Äthers, von „Ätherspannungen", von „Schwingungen der Ätherteilchen" und dergleichen zu reden. Wohl aber ist elektrische (und magnetische) Kraft, die in Wellenform sich ausbreitet, die aber auch ruhend untersuchbar ist, als eine Energieverteilung im Raum erkennbar geworden (E 129), und dabei hat sich außerdem die Energie selbst anders gezeigt als man früher von ihr dachte; sie ist nicht bloße Rechnungsgröße, sondern sie hat Masse, Gewicht und stets angebbare räumliche Verteilung (M 157, E 434 u. f.). Die in den elektrischen (und magnetischen) Kräften bemerkbaren, auch in den Lichtwellen vorliegenden Energieverteilungen haben sich vorurteilsfrei am besten durch „Kraftlinien" darstellbar gezeigt (E 129). Wir werden diese Kraftlinien und ihre Eigenschaften sehr eingehend in der Elektrizitätslehre behandeln (E 58 u. f.); die Sprache dieser Kraftlinien ist es, mit der man allein zutreffend, alle heutige Kenntnis erschöpfend, von den zu den elektrischen Vorgängen gehörigen Raumzuständen und auch von den Wellen des Lichtes reden kann. Solche, durch Kraftlinien abbildbare, wellenförmig angeordnete Energieverteilungen sind es, die im

Lichte und in den anderen elektromagnetischen Wellen mit Lichtgeschwindigkeit sich ausbreiten (19). Der Äther ist demnach das Etwas im Raume, das diese Geschwindigkeit der Ausbreitung elektrischer Kraft und damit auch des Lichtes regelt, und dies ist die Definition (Begriffsbestimmung) vom Äther, die wir — als den bisher ermittelten Tatsachen am besten angepaßt (vgl. Einl. 9 u. 13, Bd. I) — benützen werden (22 u. f.). „Ätherwelle" heißt demnach nicht Wellenbewegung des Äthers, sondern Welle im Äther: Welle elektromagnetischer Kraft, wellenförmige Anordnung elektromagnetischer Energie, die im Äther mit Lichtgeschwindigkeit läuft. Man kann in diesem Sinne gut von „Ätherwellen" reden mit ihren Bergen und Tälern, mit deren an Abbildung 1 erläuterter Bedeutung (3), ohne in die erwähnten materialistischen, keiner Erfahrung entsprechenden Ausdrücke zu verfallen.

Die ursprüngliche Vorstellung vom Äther, daß er einheitlich allen Raum erfülle — fast identisch mit dem Raum sei —, ist nach neuerer Erfahrung (134 u. f.), der unsere Definition des Äthers angepaßt ist, nicht aufrecht zu halten; vielmehr entspricht es dieser Definition, daß jeder Himmelskörper und wohl also auch überhaupt jeder Teil der Materie seinen eigenen Äther hat (23).

Danach erscheinen Äther und Materie nicht mehr als Gegensätze zu einander (vgl. Einl. 5, Bd. I), sondern der Äther ist Begleiter der Materie (vielleicht allgemeiner: Begleiter der Energie, M 157, E 584).

Daß der Äther auch noch andere, weitere Wirksamkeiten hat als nur die Regelung der Ausbreitungsgeschwindigkeit elektromagnetischer Kräfte (und die des Zusammenhangs der elektrischen mit den magnetischen Kräften, E 328), ist wohl zu denken; doch ist die Kenntnis hiervon beschränkt (E 585).

5. Wir wenden uns nun ganz zum Studium der Erscheinungen des Lichtes, wie sie dem Auge sich bieten, und damit zum reichen Hauptinhalt der Optik. Dabei werden wir auf das hier Vorausgeschickte fortlaufend zurückkommen mit Beibringung zahlloser Beweisstücke. Den anderen Teil der Beweise liefert — wie angegeben — die Elektrizitätslehre.

I. Geometrische Optik.

6. Das vor allem Auffallendste am Licht ist die Geradlinigkeit seiner Ausbreitung.

An diese Eigenschaft allein knüpft sich schon eine große Menge von Kenntnis, die man unter dem Namen der „geometrischen Optik" zusammenfaßt. Wir zeigen später (140 u. f.), daß Gradlinigkeit ohne jede seitliche Ausbreitung nur ein Grenzfall ist, geltend für Wellenlängen, die weit kleiner sind als die Schirme, Öffnungen und dergleichen, die dem Licht entgegengestellt werden. Es trifft dies für sichtbares Licht in allen vorerst zu behandelnden Fällen zu, da wir äußerst kleine Schirme, Öffnungen usw. hier nicht benutzen (vgl. 18).

a) Geradlinige Ausbreitung.

7. Schatten. — Geht Licht am Rande eines undurchlässigen Körpers vorbei, so „wirft er einen Schatten", d. h. er trennt einen Raum fortgesetzter Lichtausbreitung von einem benachbarten Raum fehlender Ausbreitung, dem „Schatten". Die Grenze zwischen beiden ist durch die Fortsetzung der geraden Linien gegeben, welche von allen Punkten der Lichtquelle nach dem schattenwerfenden Rande gezogen werden können.

8. Ist die Lichtquelle punktförmig — d. h. möglichst klein —, so ist der Schatten ein Kegelraum, dessen Spitze in der Lichtquelle liegt. Ebenso entsteht ein kegelförmiger „Strahl", wenn der undurchlässige Körper ein Schirm mit einer Öffnung ist. Der Strahl ist der durch die Öffnung ausgesonderte lichterfüllte Raum; er ist um so schärfer vom dunklen Schattenraum getrennt, je genauer punktförmig die Lichtquelle ist.

An solchen Strahlen ist in sonst dunklem Zimmer die Geradlinigkeit besonders einfach feststellbar, sei es, daß man die verschiedenen Querschnitte des Strahles durch Einschieben eines weißen Schirmes prüft, sei es, daß man die Luft nebelig macht, um den ganzen Lauf des Strahles auf einmal zu sehen.

Es kommt dabei immer zur Geltung, daß das Auge stets darauf angewiesen ist, das zu prüfende Licht, oder einen Teil desselben, in die Pupille zu erhalten. Der Lichtstrahl an sich, wenn er an dem Auge vorbeizieht, ist unsichtbar. Der weiße Schirm oder die Nebelteilchen lenken einen Teil des Lichts, von dem sie getroffen werden, allseitig auseinander (durch diffuse Reflexion, 33), so daß etwas davon ins beobachtende Auge gelangen kann, das dadurch die Anwesenheit von Licht an den getroffenen Stellen der Hilfskörper feststellen kann (vgl. 11).

9. Lichtstrahlen, als von jedem Punkte einer Lichtquelle ausgehende geradlinige Fortpflanzungswege der Lichtenergie, sind das Hauptorientierungsmittel in der ganzen Optik, vorzüglich aber in der geometrischen

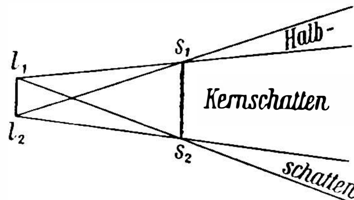
Optik, welche letztere auf die nähere Beschaffenheit dieser Strahlen, sowie auf die Grenzen der Verwirklichungsmöglichkeit beliebig schmaler Strahlen (6, 18) nicht einzugehen braucht. Die beobachtbaren Strahlen (8) können im Vergleich zu geometrisch definierten unendlich schmalen Strahlen auch **Strahlenbündel** genannt werden.

Kleine Flächenstücke oder Räume, von welchen Lichtstrahlen ausgehen, werden wir immer kurz „**leuchtende Punkte**" nennen.

10. Ist die **Lichtquelle flächenhaft**, so gibt sie unscharf begrenzte Schatten; lichtloser und lichterfüllter Raum gehen allmählich ineinander über, was aber wieder nur Folge der geradlinigen Ausbreitung ist.

Man kann hier zwei Fälle unterscheiden:

1. Die flächenhafte Lichtquelle $l_1\,l_2$ (Abb. 2a) sei **kleiner** als der schattenwerfende Schirm $s_1\,s_2$. Es genügt, die vier in der Abbildung gezeigten geraden



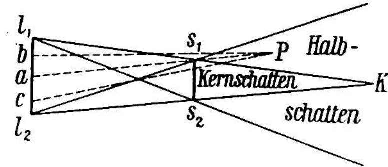


Abb. 2a. Schattenbildung. Abb. 2b.

Linien zu ziehen von den Rändern der Lichtquelle zu den Rändern des Schirmes, um alles zu übersehen, was infolge geradliniger Ausbreitung zu erwarten ist und was auch der Wirklichkeit entspricht. Es findet sich hinter dem lichtundurchlässigen Schirm ein Raum, in welchen von keinem Punkte der Lichtquelle Licht gelangen kann: der „Kernschatten". Dieser Raum ist rings umgeben vom teilweise erleuchteten „Halbschatten". Beide, Kernschatten wie Halbschatten, erstrecken sich in diesem Falle kegelförmig bis ins Unendliche.

2. Ist die Lichtquelle **größer** als der schattenwerfende Körper (Abb. 2b), so führen dieselben vier geraden Linien zur Erkenntnis des hier räumlich beschränkten, im Punkte K endenden Kernschattens, der wieder vom — jedesmal bis ins Unendliche gehenden — Halbschatten umgeben ist.

Die Übergänge von der vollständigen Dunkelheit des Kernschattens in die vollständige Erleuchtung außerhalb des Halbschattens sind immer allmählich, „stetig". Man kann die an jedem beliebigen Punkte P des Halbschattens vorhandene Helligkeit, „Lichtintensität", richtig beurteilen nach der Größe des Flächenstücks der Lichtquelle, welches nach diesem Punkte hin Licht senden kann, d. h. von welchem aus gerade Linien nach dem Punkte P führen, die nicht durch den Schirm gehen. In der Abb. 2b ist der nach P hin wirkende Teil der Lichtquelle durch l_1 a gekennzeichnet. Vom Punkte b der Lichtquelle beispielsweise gelangt Licht nach P, vom Punkte c nicht. Ein in P befindliches Auge würde auch nur das entsprechende Stück l_1 a der Lichtquelle zu sehen bekommen.

Der Fall der Abb. 2b findet sich in besonders gut nachprüfbarer Weise ver-

wirklicht bei den Sonnenfinsternissen. Lichtquelle ist hier die Sonne, schattenwerfendes Hindernis der Mond. Punkte der Erdoberfläche, die im Kernschatten sich befinden, haben „totale“, im Halbschatten befindliche „partielle“ Sonnenfinsternis; „ringförmig“ ist die Finsternis, wenn der Beobachter jenseits K im Halbschatten sich befindet. Die Prüfung der Geradlinigkeit ist hier in Verbindung mit der Kenntnis von der Mond- und Erdbewegung deshalb besonders günstig, weil sehr lange Lichtstrahlen in Betracht kommen und weil eine Mondatmosphäre, die die Lichtstrahlen stören könnte, nicht vorhanden ist.

11. Lochkammer. — Eine andere, durch die geradlinige Lichtausbreitung bedingte Erscheinung ist die Abbildung leuchtender oder beleuchteter Gegenstände auf einem Schirm mittels eines Loches in dazwischengestellter Wand. Es sei in Abb. 3 s s der Schirm, auf welchen ausschließlich durch das Loch L in der Wand w w Licht fallen kann. Es wird dann etwa der Baum r g auf dem Schirm abgebildet. Das Sonnenlicht, welches eine Stelle g eines grünen Blattes des Baumes trifft, wird von dort als grünes Licht allseitig weitergegeben, so als würde das Blatt selbst eine Quelle grünen Lichtes sein (33). Von diesem Licht fällt ein Teil durch das Loch L in der Wand w w und trifft in geradliniger Ausbreitung zwischen den in der Abbildung punktiert gezeichneten Grenzen den Schirm, der aus weißem Papier oder mattem Glas bestehe, und gibt dort einen grün beleuchteten Fleck G. Von jedem Punkt dieses Fleckes wird das grüne Licht am Schirm wieder allseitig zerstreut (33), so daß ein den Schirm beobachtendes Auge auch einen Teil davon erhält und infolgedessen den Eindruck grünen Leuchtens des Flecks G hat, so wie es auch beim Besehen des Baumes die Stelle g am Blatt grün leuchtend sieht[1]).

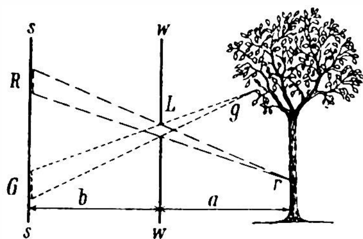


Abb. 3. Lochkammerbild.

12. Optische Bilder. — Der Fleck G am Schirm ist somit für das Auge ein gleichwirkender Ersatz für die Stelle g des Baumes. Man nennt einen solchen Ersatz ein „optisches Bild“ oder kurz „Bild“ und das Ersetzte den „Gegenstand“. G ist somit das Bild von g, und in ganz gleicher Weise wird der ganze Baum Stelle für Stelle auf dem Schirme abgebildet, z. B. auch ein Punkt r mit braunem Licht in dem Fleck R des Schirmes. Das Gesamtbild auf dem Schirm hat die Eigentümlichkeit verkehrt zu sein, entsprechend der Kreuzung sämtlicher Strahlen im Loch. Seine Größe ist von den Abständen a und b abhängig, wie es dem geradlinigen Lauf der Strahlen entspricht. Außerdem ist

[1]) Das Auge ist ohne weiteres nicht befähigt, selbstleuchtende Gegenstände von beleuchteten, das Licht gegen das Auge hin zerstreuenden Gegenständen zu unterscheiden. Denn der Gang der Lichtstrahlen ins Auge ist in beiden Fällen der gleiche: divergent in geraden Linien von der betreffenden Stelle des Gegenstandes ausgehend. Nur zusätzliche Beobachtungen können — oft sehr leicht — entscheiden, ob ein gesehener Gegenstand selbstleuchtend oder nur beleuchtet ist. Bei von vornherein bekannten, irdischen Gegenständen ist selten Zweifel vorhanden; in anderen Fällen muß Unsicherheit bestehen, wenn zusätzliche Beobachtungen fehlen. So war es unsicher, ob der Planet Venus selbstleuchtend oder von der Sonne beleuchtet sei, bis Galilei mit dem Fernrohr die Lichtgestalten der Venus, gleich denen des Mondes aufdeckte (66).

aber zu bemerken, daß das Bild unscharf, verwaschen ist, was wieder der geradlinigen Ausbreitung entspricht. Jeder Punkt des Gegenstandes ist als Fleck oder Klecks abgebildet, und die einzelnen, benachbarten Kleckse überdecken sich gegenseitig. Die Kleckse werden kleiner, das Bild wird schärfer, wenn das Loch verkleinert wird; zugleich wird aber das Bild auch dunkler, da die Gesamtmenge des Lichtes, das ihm zur Verfügung steht und die nur durch das Loch kommen kann, entsprechend verringert ist. Ganz scharfe Bilder erhält man mit der Lochkammer niemals.

Das Bild auf dem Schirm wird „reell" (wirklich) genannt, weil tatsächlich Licht dorthin fällt, wo es gesehen wird. Es gibt auch — in anderen Fällen — „virtuelle" (scheinbare) Bilder, bei denen dies nicht zutrifft (29, 62). Reelle Bilder sind immer auf Schirmen auffangbar, virtuelle nicht.

13. Besonders bemerkenswert ist bei der Entstehung des Lochkammerbildes, daß sämtliche Strahlen all der vielen Einzelpunkte in dem Loch einander gekreuzt haben, ohne dabei weder in der geradlinigen Weiterausbreitung, noch sonstwie einander zu stören. Dies entspricht aber der Wellennatur des Lichtes; denn störungsfreie Übereinanderlagerung gleichzeitig an einem Orte befindlicher Wellen ist allgemein bekannt, so bei Wasserwellen, bei Schallwellen (A 68), und entspricht überhaupt der störungsfreien Übereinanderlagerung von Kräften beliebiger Art (M 45), wie sie in Wellen verschiedener Art wirksam sind.

14. Noch viel feiner überzeugend als die Lochkammer sind für die geradlinige Ausbreitung des Lichtes innerhalb der angegebenen Grenzen (6, 18) die vielen optischen Instrumente (64 u. f.), die — auf Grund der geradlinigen Ausbreitungsweise ausgedacht — mittels Spiegeln oder Linsen Bilder von tadellosester Schärfe entwerfen.

15. Lichtintensität und Beleuchtungsstärke. — Intensität (Stärke) irgend einer Strahlung ist stets bemessen durch die senkrecht auf die Flächeneinheit in der Zeiteinheit fallende Menge dessen, was die Strahlung überhaupt mitbringt.

Beim Licht und bei jeder Wellenstrahlung ist es die Menge der Energie, wie schon beim Schall eingehend erläutert (A 19, 20, 21). Lichtintensität oder Lichtstärke, auch Lichtmenge genannt, ist demnach bemessen durch die in 1 sek auf 1 cm² senkrecht fallende Energiemenge ($E^2c/4\pi$, s. E 365, 433).

Ein weißer Schirm, welcher diese Lichtenergie auffängt, hat die ebenso bemessene Beleuchtungsintensität oder Beleuchtungsstärke oder Helligkeit, die er für das Auge weitergeben kann (vgl. 11).

Fällt das Licht auf eine vollkommen schwarze Fläche, die es vernichtet (absorbiert), so muß seine Energie nach dem Energiegesetz in anderer Form erscheinen und zwar kann sie ganz die Form von Wärme annehmen (93). Messung solcher Wärmewirkung des Lichts ist das beste Mittel zur Messung von Lichtintensität.

Doch kann man Lichtintensität auch mit dem Auge beurteilen, worauf wir sogleich näher eingehen (17).

16. Intensitätsabnahme bei freier Ausbreitung. — Wenn eine punktförmige Lichtquelle allseitig frei in den Raum hinausstrahlt, so läuft die

von ihr ausgehende Energie mit zunehmendem Abstand von der Quelle durch immer größere Kugelflächen hindurch, die man mit dem Mittelpunkt in der Quelle um diese gezogen denken kann. Dem entsprechend fällt mit zunehmendem Abstand immer weniger Energie auf die Flächeneinheit je einer der Kugelflächen, und zwar im Verhältnis des Quadrates des Abstandes, weil in diesem Verhältnis die Größen der Kugeloberflächen wachsen. Daher das Gesetz der Intensitätsabnahme des Lichtes mit steigendem Abstand von der Lichtquelle, verkehrt proportional dem Quadrat des Abstandes. Es ist dies dasselbe Gesetz, das aus gleichem Grunde auch beim Schall gilt (A 27).

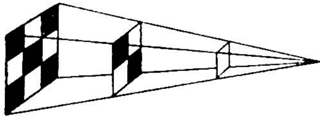


Abb. 4. Intensitätsabnahme nach dem verkehrten Entfernungsquadrat.

Das Gesetz gilt auch bei nur einseitiger freier Ausbreitung des Lichts, was die Abbildung 4 veranschaulicht; es kommt dabei nur auf die geradlinige Divergenz der Strahlen an.

Bei nicht freier Ausbreitung von der Quelle kann die Divergenz fehlen, wie bei einem Scheinwerfer (31), der parallele Strahlen gibt; es fehlt dann auch die Intensitätsabnahme.

Das Entfernungsquadratgesetz gilt auch bei freier Ausbreitung von beliebig großen, kugelförmigen Lichtquellen; nur muß dann der Abstand vom Kugelmittelpunkt aus gerechnet werden.

17. Photometrie. — Nach dem Entfernungsquadratgesetz ist es möglich, durch Abstandsänderung einer gegebenen Lichtquelle von einem Schirm, beliebig abgestufte Beleuchtungsintensitäten auf demselben herzustellen. Darauf beruht die Photometrie, Messung von Lichtintensitäten mittels des Auges.

Besonders können Leuchtstärken von Lichtquellen so gemessen werden, worunter die Gesamtenergie zu verstehen ist, welche die Quelle in der Zeiteinheit als Licht aussendet.

Das Auge ist nicht befähigt, Lichtintensitäten zahlenmäßig vergleichend zu beurteilen; nur Gleichheit zweier Lichtintensitäten kann es mit Sicherheit feststellen (und auch dies nur bei Farbengleichheit). Will man zwei ungleiche Lichtquellen vergleichen, so verfährt man daher so, daß man sie in verschiedene Abstände vom beobachteten Schirm bringt, so daß sie dort gleiche Helligkeit ergeben, worauf nach dem Abstandsquadratgesetz gerechnet wird.

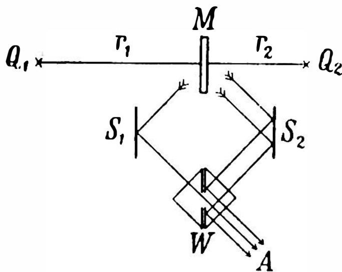


Abb. 5. Photometerwürfel. (Künstlicher Fettfleck.)

Zu guter Vergleichung der Helligkeiten kann ein vor den Schirm gestellter Stab dienen, der von den zwei Lichtquellen zwei Kernschatten wirft; jeder der Schatten empfängt nur Licht von einer der zwei Quellen, wodurch die Beleuchtungsstärken der zwei Quellen für das Auge vergleichbar werden, so daß sie durch Abstandsänderung auch gleichgemacht werden können (Graf Rumford). Zu feineren Messungen dient ein Fettfleck auf Papier (Bunsen 1859), der zwischen die beiden Lichtquellen gestellt wird; ist derselbe von beiden Seiten gleich hell beleuchtet, so verschwindet er. Ein verfeinerter Ersatz des Fettflecks ist der Photometerwürfel (Abb. 5). Die beiden zu vergleichenden Lichtquellen Q_1, Q_2 beleuchten zunächst je eine Seite der (undurchsichtigen) mattweißen Platte M und von dieser kommen die Lichter mittels Spiegeln S_1, S_2 zum Glaswürfel W, der aus zwei Teilen besteht, die nur in der Mitte zusammenhängen.

Diese Mitte ersetzt den Fettfleck; sie läßt alles Licht von der Quelle Q_1, keines von Q_2, zum beobachtenden Auge A, während der Rand umgekehrt sich verhält. Totale Reflexion (36) an der Luftschicht im Würfel ist dabei in leicht ersichtlicher Weise wesentlich.

Als Einheit der Leuchtstärke dient die Amylazetatlampe („Hefnerkerze", anstelle der früheren Normalkerze) mit ihrer scharf einstellbaren Flammenhöhe bei festgesetzten Abmessungen des Brenners.

Die Einheit der Beleuchtungsintensität („Hefnermeter" oder „Lux") findet sich auf einer Fläche, die in 1 m horizontalem Abstand von der Amylazetatlampe senkrecht von deren Licht getroffen wird.

Lichter ungleicher Farbe können mit dem Auge nicht photometriert werden.[1]) Hier, und erst recht wenn die Intensitäten unsichtbarer Lichter gemessen werden sollen (Ultrarot, Ultraviolett) ist letztes Mittel immer die Benutzung der Wärmewirkung (15, 93; Thermosäule, Bolometer, E 169, 226).

18. Gültigkeitsgrenzen der Geradlinigkeit. — Zur geradlinigen Ausbreitung des Lichtes ist zweierlei zu bemerken.

Erstens scheinen die scharfen Grenzen von Licht und Schatten, sowie die schmalen, von Öffnungen ausgesonderten Strahlen der Wellennatur des Lichtes zu widersprechen. Denn Wellen greifen um Hindernisse herum. Man kann das an Wasserwellen sehen, und offenkundig ist es auch von den Schallwellen (A 28). Wellen gehen aber um so mehr um die Ecke, je länger sie sind, und um so weniger, je kürzer sie sind (143). Die Wellen des Lichtes sind außerordentlich kurz; ihre Länge geht nur in die Zehntausendstel Millimeter, und dem entspricht es, daß man im allgemeinen wenig davon merkt, daß sie auch um die Ecke gehen, daß eine seitliche Ausbreitung von Strahlenbündeln wohl stattfindet. Man nennt dies die Beugung des Lichts. Sie ist — entsprechend der Kurzwelligkeit — so gering, daß sie als Abweichung von der gewohnten (schon von Euklid festgestellten) Geradlinigkeit erst entdeckt werden mußte (Grimaldi, um 1650). Wir werden diesen Einfluß der Wellenlänge ganz allgemein bei der Behandlung der Beugung untersuchen (140 u. f.), wobei die Geradlinigkeit in der Tat als Grenzfall für nicht zu lange Wellen bezw. nicht zu kleine Hindernisse sich zeigt, wie schon am Eingange der geometrischen Optik bemerkt (6). Die Wellennatur des Lichtes bedingt es auch, daß Strahlen (9) nicht schmäler sein können als die Lichtwellenlänge; versuchte man durch engste Öffnungen noch schmälere Strahlen zu verwirklichen, so zeigt sich an deren Stelle allseitiges Auseinandergehen des Lichtes hinter dem Schirm (144).

Zweitens gibt es eine andere Gültigkeitsgrenze der Geradlinigkeit. Nicht Einwirkung von undurchlässigen Schirmen, auch nicht von durchstrahlter durchlässiger Materie ist hier gemeint, sondern krummlinige Ausbreitung im freien Äther. Solche ist durch Gravitation zu erwarten, sobald Licht an großen Massen vorbeigeht. Denn Licht ist — wie alle Strahlung — Energie in Bewegung, und es ist ein guter Nachweis dafür da, daß Energie der Gravitation unterworfen ist (E 582). Ein horizontaler Lichtstrahl ist demnach zur Erde hinab gekrümmt zu erwarten, allerdings in unnachweisbar geringem Maße. Ursache der Geringfügigkeit der Gravitationswirkung ist die außerordentlich große Laufgeschwindigkeit des Lichtes. Jede andere Energiemenge, jeder materielle Körper, ebenso schnell bewegt, würde auch ebenso geradlinig an der Erde vorbeilaufen wie Licht. Die Wirkung des Mondes auf Lichtstrahlen ist, entsprechend seiner kleineren Masse noch kleiner als die der Erde; es könnte infolge der Krümmung der Lichtstrahlen in Mondnähe die Schattengrenze des Mondes auf der Erde bei Sonnenfinsternis nur um wenige cm abgelenkt sein, was unmerklich ist. Nur bei der sehr großen Masse der Sonne ist nachweisbare Krümmung zu erwarten, deren Beobachtung allerdings durch die Sonnenatmosphäre gestört ist. Wir gehen darauf in allgemeinem Zusammenhange in der Elektrizitätslehre ein (E 434 u. f.).

b) Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes.

19. Schallverspätungen bemerkt man leicht in irdischen Abständen (A 23); Lichtverspätungen wurden zuerst in den großen Räumen des Sonnensystems merklich und meßbar, und damit ergab sich zum erstenmal die Kenntnis von der außerordentlich großen, aber doch nicht unendlich großen Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes (O. Römer 1676).

---

[1]) Bei geringer Farbenungleichheit geht es noch mit wenig Unsicherheit.

Die Beobachtungen betrafen den inneren, großen Jupitermond, der ziemlich schnell um Jupiter läuft. Das bei jedem Umlauf stattfindende Verschwinden des Mondes im Kernschatten des Jupiter wurde mit Zeitmessung verfolgt. Die Zwischenzeiten zweier Schatteneintritte sollten zu genauer Ermittelung der Umlaufszeit des Mondes dienen; sie erwiesen sich aber in bemerkenswerter Weise ungleich. Die Umlaufszeiten erschienen länger in dem halben Jahre, während die Erde von E über E_3 bis E_1 läuft (Abb. 6), und sie erschienen kürzer im anderen halben Jahre. Alle Einzelheiten zeigten sich dabei in Übereinstimmung mit der Annahme, daß die Ungleichheit nur scheinbar und zwar Folge merklich verschiedener Laufzeiten des Lichtes je nach Stellung der Erde in ihrer Bahn seien. Im ersten Halbjahr entfernt sich die Erde von Jupiter und das Licht muß der Erde nacheilen; daher die Verlängerungen der Zeiten, die im anderen Halbjahre, da die Erde dem Licht entgegenkommt, wieder eingeholt werden. Es ist dann die Lichtgeschwindigkeit einfach zu berechnen, wie jede Geschwindigkeit, als Quotient aus Weg und zugehöriger Zeit, und es kann als Weg der Erdbahndurchmesser $E E_1$ eingesetzt werden, wozu als Zeit die Gesamtverspätung der Schatteneintritte in dem halben Jahre gehört. Diese Gesamtverspätung betrug rund 1000 sek, und der Erdbahndurchmesser ist rund 300 Millionen km. Dies gibt für die Lichtgeschwindigkeit rund 300 000 km/sek. Fortgesetzt verfeinerte Beobachtungen gaben 299800 km/sek.

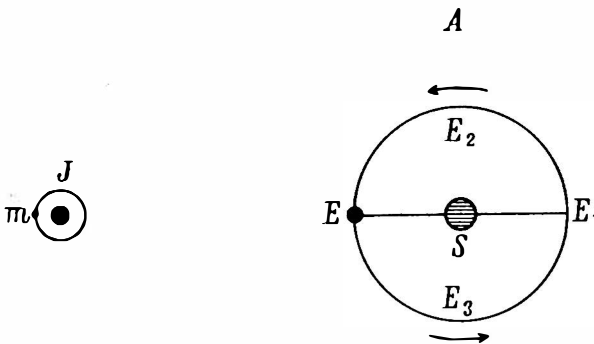


Abb. 6. Zu O. Römers Messung der Lichtgeschwindigkeit.

20. Die ersten Beobachtungen in irdischen Abständen (Fizeau 1849) wurden bei einer Wegstrecke von etwa 10 km gemacht, die das Licht von R nach S (Abb. 7) und, dort vom Spiegel S reflektiert, wieder zurück, also zweimal durchlaufen mußte. Die dazu erforderliche Zeit wurde mittels des schnell um die Achse x x laufenden Rades R (in der Abbildung von der Kante erscheinend) gemessen. Das Rad war gezahnt, und das von der Lichtquelle L kommende und von der durchsichtigen Glasplatte G nach S hin reflektierte Licht mußte zwischen zwei Zähnen des Rades hindurchgehen. Steht das Rad still, so kann auch das von S zurückkehrende Licht durch die Zahnlücke und dann ins Auge A des Beobachters kommen, der somit Helligkeit in der Richtung nach S sieht. Ist aber das Rad in genügend schneller Drehung, so findet sich bei der Rück-



Abb. 7. Erste irdische Messung der Lichtgeschwindigkeit (Fizeau).

kehr des Lichtes ein Zahn an Stelle der Lücke, und es kann daher kein Licht in das Auge A des Beobachters gelangen; er sieht Dunkelheit an Stelle der Helligkeit. Bei 2 mal so schneller Drehung des Rades kann er wieder Helligkeit sehen, da dann wieder eine Lücke an Stelle der vorigen sich findet, wenn das Licht zurück an das Rad kommt. Man sieht, daß aus der Drehzahl (15/sek für das Verschwinden des Lichtes) und der Zahnzahl (500) des Rades leicht die Zeit erhältlich ist, die zum Lichtwege von 2·10 km gehört; sie betrug rund 1/15000 sek. Aus Weg und Zeit ergibt sich wieder rund 300000 km/sek als die Lichtgeschwindigkeit.

Es sind auch weiter noch wiederholte Geschwindigkeitsmessungen in irdischen Abständen ausgeführt worden, meist mit Zuhilfenahme sehr schneller Drehungen, auch sogar im Raume eines Zimmers (zuerst Foucault 1850 mit Drehspiegel. Vgl. auch Note zu 159). Als Gesamtergebnis aller solcher Messungen in irdischen Abständen kann 299800 km/sek angegeben werden[1]), was mit den Ergebnissen im Planetenraum übereinstimmt.

21. Lichtgeschwindigkeit gut gesichert. — Man sieht, daß es bei diesen Lichtgeschwindigkeitsmessungen jedesmal auf möglichst plötzlich eröffnete oder abgeschnittene Lichtwege ankommt, sei es durch Jupiter mit seinem Schatten oder durch das Rad mit seinen Zähnen oder durch die Drehung eines Spiegels. Es entstehen dabei abgeschnittene Wellenzüge, deren Anfang oder Ende als Beobachtungsmarke in dem sonst unterschiedslos vorbeilaufenden Wellenzug dient. So ist im Zahnradversuch beim vollkommenen Verschwinden des Lichtes in dem Augenblicke des Dazwischentretens eines Zahnes die Strecke RSR (Abb. 7) ganz von Lichtwellen erfüllt, und dieser 20 km lange Wellenzug läuft vollkommen an den Zahn ab; kommt die nächste Lücke heran, so ist die ganze Strecke lichtleer. Bei verdoppelter Drehzahl sind die einzelnen abgeschnittenen Wellenzüge nur 10 km lang.

Man kann fragen, ob solche fortwährende Zerstückelung der Lichtwellenzüge nicht eine veränderte Ausbreitungsgeschwindigkeit bedingen könnte. Die Antwort ist sowohl durch die Übereinstimmung der Messungen bei sehr verschiedenen Zerstückelungsperioden verneinend gegeben, als auch durch Überlegungen, welche einen Einfluß von Zerstückelung nach allem Bekannten nur bei der Ausbreitung in Medien anzeigen, in welchen die Lichtgeschwindigkeit von der Wellenlänge abhängig ist (farbenzerstreuende Medien, s. 52)[2]). Dieser Einfluß hat sich in der nach der Berechnung zu erwartenden Größe bei Lichtgeschwindigkeitsmessungen in Schwefelkohlenstoff auch wirklich gezeigt, was einem besonderen Nachweis des Fehlens des Einflusses im freien Äther gleichkommt[3]).

Die Lichtgeschwindigkeitsmessungen sind somit gut gesichert. Die Übereinstimmung aller vorhandenen Messungen geht soweit, als deren Genauigkeit geht (20). Es kann danach für die — gewöhnlich mit c bezeichnete — Licht-

---

[1]) Die in Luft gewonnenen Ergebnisse sind dabei nach dem Brechungsexponenten der Luft auf luftleeren Raum umgerechnet (41, 42).

[2]) Die Überlegungen behandeln einen zerstückelten Wellenzug wie eine Summe verschieden langer Wellen (A 64).

[3]) Das Bedenken, daß vielleicht die bei allen Messungen benutzten Enden eines begrenzten Wellenzuges mit anderer Geschwindigkeit laufen könnten als die Mitte des Wellenzuges, ist auch nicht berechtigt; denn es würden damit Wellenlängenänderungen, d. i. Farbenerscheinungen auftreten müssen, wovon nichts beobachtet wurde.

geschwindigkeit im materiefreien Raum abgerundet $c = 300000$ km/sek $= 3 \cdot 10^{10}$ cm/sek gelten.

Es ist dies eine der wichtigsten Naturkonstanten: die Geschwindigkeit, mit welcher elektromagnetische Wellen (3) im Äther laufen (4), oder allgemeiner: die Geschwindigkeit der Ausbreitung elektromagnetischer Kräfte im Äther (E 331, 420).

22. Lichtgeschwindigkeit c stets bezogen auf den Äther. — Wie jede Geschwindigkeit hat auch die Lichtgeschwindigkeit nur Sinn und Bedeutung, wenn angegeben wird auf welches, bei der Messung als ruhend angenommenes Raumgebilde sie sich bezieht, oder kurz: gegenüber was, relativ zu was, entlang was sie gelte (vgl. M 42). Bei gemessenen Geschwindigkeiten kommt es für diese Frage immer darauf an, woran der bei der Messung benutzte Längenmaßstab befestigt war oder was als solcher Maßstab diente. Bei den Messungen der Lichtgeschwindigkeit im Himmelsraum (19) lag das Längenmaß am Sonnensystem fest — der gemessene Weg war Erdbahndurchmesser —, bei den irdischen Messungen (20) lag er an der Erdoberfläche oder im Beobachtungszimmer fest. Die beiden Meßergebnisse könnten daher verschieden sein; denn die Erdoberfläche ist unzweifelhaft im Sonnensystem bewegt; sie hat die Geschwindigkeit der täglichen Drehung und der jährlichen Bahnbewegung der Erde im Sonnensystem. Letztere, die überwiegend ist, beträgt rund 30 km/sek; einen solchen verhältnismäßig kleinen Unterschied können aber die Lichtgeschwindigkeitsmessungen nicht aufdecken. Die Frage nach der Bezugsmäßigkeit der gemessenen Lichtgeschwindigkeit ist also so nicht zu beantworten, und die Übereinstimmung der Messungsergebnisse trotz Verschiedenheit der Bezugnahme ist kein Widerspruch.

Als Bezugsgegenstand für die Lichtgeschwindigkeit ist jedoch von vornherein der Äther gegeben, den wir hierzu bereits eingeführt und danach definiert haben (2, 4); ein anderer Bezugsgegenstand ist sinnvoll auch gar nicht vorhanden. Eine Wellengeschwindigkeit bezieht sich immer auf das Medium, in welchem die Welle läuft (A 5, 23), und wenn die Lichtwellen im Himmelsraum, fern von Materie, überhaupt eine bestimmte Geschwindigkeit einhalten, was die Messungen am Jupitermond zeigten (19), und zwar eine von Bewegungen der Lichtquelle unabhängige Geschwindigkeit (25, 26), so muß etwas im Raum sein, was diese Geschwindigkeit regelt, und als dieses Etwas ist der Äther eingeführt. Die Lichtgeschwindigkeit kann demnach nur relativ zum Äther ihre bestimmte Größe haben, und davon gehen wir im weiteren aus.

23. Der Äther nicht einheitlich. — Eine Messung der Lichtgeschwindigkeit relativ zum Äther ist unmittelbar nicht ausführbar, weil man am Äther keinen Längenmaßstab befestigen kann. Es kann also nur darauf ankommen festzustellen, ob oder wie die Erde, relativ zu welcher gemessen ist (20), gegen den Äther an ihrer Oberfläche bewegt ist. Solche Feststellung ist möglich, insofern Richtung und Größe der Geschwindigkeit der Erdbewegung im Sonnensystem jederzeit bekannt ist. Vergleichsmessungen der Lichtgeschwindigkeit an irgendeinem Orte der Erde bei Richtung des Lichtstrahls in Bewegungsrichtung des Ortes und senkrecht dazu müßten einen Unterschied geben, wenn Erde und Äther gegeneinander bewegt sind, und die Größe des Unterschiedes gäbe auch die Geschwindigkeit dieser Bewegung an. Solche Vergleichsmessungen sind mit

großer Feinheit ausführbar, so daß sie Unterschiede von wenigen km/sek angeben könnten; wir beschreiben das auf Lichtinterferenz beruhende Verfahren später (138). Die Ergebnisse sehr vieler Messungen dieser Art sind fast ganz negativ; sie zeigen in einfachster Auffassung, daß eine Verschiebung des Äthers an der Erdoberfläche entweder gar nicht stattfindet oder doch nur mit einem kleinen Teil der Geschwindigkeit von etwa 30 km/sek, welche zu erwarten wäre, wenn die Erde durch einen im Sonnensystem ruhenden Äther hindurch sich bewegte. Es ist daher zu denken, daß die Erde ihren eigenen Äther hat, den sie mit sich führt. Hiermit stimmen auch elektrische Versuche mit Kondensatoren überein (s. 138).

Danach ist aber auch jedem anderen Planeten und wohl auch der Sonne und den anderen Sonnen, ja wohl überhaupt jedem Stück Materie[1]) ein eigener Äther zuzuschreiben. In besonderer Weise zeigt letzteres die Induktion in bewegten Leitern, die überhaupt wohl den einfachsten, daher überzeugendsten Nachweis vom mitbewegten Eigenäther aller Körper liefert (E 405).

Der Äther im Himmelsraum ist somit nicht einheitlich.

Die Lichtgeschwindigkeitsmessung im Planetenraum (19) zeigt, daß die Geschwindigkeit c auch in den Äthern der anderen Himmelskörper des Sonnensystems soweit gilt, als die Meßgenauigkeit geht.

Gleichzeitiges Vorhandensein zu verschiedenen Körpern gehöriger Äther am selben Orte ist nicht zu bezweifeln; sie machen zusammen den Äther des Ortes aus.

Eine Grenze der Erstreckung des Erdäthers — eine Verminderung seines Vorwiegens vor den Äthern der entfernteren Körper des Himmelsraumes — ist in bisher versuchten Höhen über dem Erdboden, auf Bergen, nicht deutlich merklich geworden.

Gelangt Licht aus einem Äther in einen anderen, anders bewegten, so ist eine Geschwindigkeitsänderung der Lichtwellen beim Übergang anzunehmen, da die Lichtgeschwindigkeit c stets relativ zum Äther des Ortes gelten soll (4, 22). Solche Lichtgeschwindigkeitsänderungen sind in den großen Himmelsräumen zu erwarten (vgl. 26). Hierüber ist indessen bisher wenig bekannt; wir werden darauf eingehen, soweit Beobachtungen vorliegen (26, 136, 138).

24. Aberration. — Alle Gestirne, die in einer zur Richtung der Erdbewegung senkrechten Richtung beobachtet werden (z. B. ein in Richtung nach A befindlicher Stern von E_2 aus, Abb. 6), erscheinen in Richtung der Erdbewegung verschoben (Bradley 1728). Man nennt dies die Aberration. Die Verschiebung wird dadurch merklich, daß ihre Richtung mit der Umkehr der Bewegungsrichtung der Erde nach ½ Jahr (wenn die Erde von E_2 nach E_3 kommt) sich ebenfalls umkehrt. Daher scheinen alle in der Erdbahnebene (Ekliptik, Zeichnungsebene von Abb. 6) liegenden Gestirne eine jährliche hin- und hergehende Bewegung zu machen, die an den Polen der Ekliptik befindlichen Gestirne eine Kreisbewegung und die zwischenliegenden elliptische Bewegungen. Die Amplitude dieser Aberrationsbewegungen ist sehr klein, sie beträgt nur 20·5″ nach jeder Richtung; im ganzen 2mal so viel im Jahr in der Ekliptik.

Die schon bei der Entdeckung, mit Kenntnis von Römers Lichtgeschwindig-

[1]) Über die Verallgemeinerung auf die Energie siehe E 584.

keitsmessungen, gegebene Erklärung liegt darin, daß die Bahngeschwindigkeit der Erde doch nicht ganz verschwindend klein ist gegen die Lichtgeschwindigkeit. Das beobachtende Fernrohr wandert merklich mit der Erde, während der vom Gestirn kommende Lichtstrahl seine Länge durchsetzt. Ist das Fernrohr quer zum Strahl bewegt, wie bei Beobachtung des Sternes A an den Stellen E_2 und E_3 der Erde, so muß es aus diesem Grunde um einen gewissen Winkel vorausgeneigt werden um das Licht zentrisch aufzufangen, so daß das Bild des Sterns am Fadenkreuz erscheint. Dieser Winkel ist der Aberrationswinkel.

Das Licht spielt hierbei keine andere Rolle als die eines Geschosses, das zentrisch aufgefangen werden soll. Ein treffender Vergleich, der auch zu richtiger Rechnung führt, ist der folgende: Ein Schiff S S (Abb. 8) sei in Pfeilrichtung bewegt, während es von einem längs A B bewegten Geschoß getroffen wird. Trifft das Geschoß in a die Schiffswand und durchschlägt dieselbe dort, so wird es die zweite Schiffswand nicht in b treffen, sondern in b_1. Denn während das Geschoß von a bis b läuft, legt das Schiff die Strecke b b_1 zurück, so daß an der Stelle b der Geschoßbahn die Stelle b_1 der Schiffswand sich befindet und also vom Geschoß getroffen wird. Das Ergebnis ist, daß der Schußkanal am Schiff die Richtung a b_1 zeigt, die um den Winkel α von der Flugrichtung A B oder a b des Geschosses verschieden ist, als wäre das Geschoß mehr von vorn gekommen als es wirklich der Fall war. Es ist $\operatorname{tg} \alpha = bb_1 : ab$, was aber gleich dem Verhältnis Schiffsgeschwindigkeit : Geschoßgeschwindigkeit ist, weil bb_1 und ab gleichzeitige Wege von Schiff und Geschoß sind. Ebenso ist die Tangente des bereits angegebenen Aberrationswinkels von 20·5″ gleich dem Verhältnis Erdgeschwindigkeit : Lichtgeschwindigkeit, was mit aller vorhandenen Genauigkeit zutrifft.

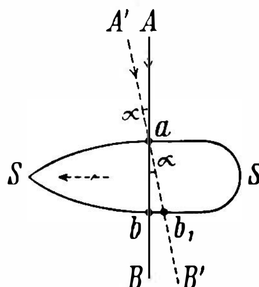


Abb. 8. Zur Aberration.

Der Aberrationsvorgang ist somit seinem Ergebnis nach sehr einfach. Es ist nichts anderes, als wenn jemand unter senkrecht herabfallendem Regen entlang geht; er wird vorn mehr naß werden als hinten, als käme der Regen schräg von vorn, und entsprechend schräg würde er auch seinen Regenschirm halten müssen, damit derselbe den Regen zentrisch auffängt.

Dieses einfache Verhalten des Lichts bei der Aberration kann festgehalten werden durch die Angabe, daß das Licht zwar in Strahlrichtung als Welle mit der Geschwindigkeit c im Äther läuft, daß es aber quer zur Strahlrichtung als geschleuderte Masse sich verhält, die bei Abwesenheit von Kräften ihre Bewegungsrichtung beibehält unabhängig von vorhandenen Querbewegungen des Äthers. Daß Lichtstrahlen Masse haben ist auch unzweifelhaft, da sie Energieinhalt haben (E 434).

25. Aberration eine Erscheinung der Relativbewegung des Beobachters zum Lichtstrahl, nicht zur Lichtquelle. — Ein bewegter Beobachter sieht seine Umgebung an sich vorbeiziehen. Dabei kann er in vielen Fällen nicht erkennen, ob die von ihm beobachtete Bewegung nur ihm selbst zugehört oder ob — bzw. zu welchem Teile — es Bewegung der Umgebung ist. Auch beim eben betrachteten Falle des durchschossenen, bewegten Schiffes (Abb. 8) ist es so. Wäre nicht das Schiff bewegt, sondern das feuernde

Geschütz (etwa ein Schiffsgeschütz) in entgegengesetzter Richtung quer zur Schußlinie bewegt, so wäre der Erfolg genau derselbe: der Schußkanal würde wieder $a\,b_1$ sein, nicht a b, und die Richtung des Geschützes, A B, würde wieder um den Aberrationswinkel gedreht, als A′ B′ erscheinen. Denn die nach rechts gerichtete Geschwindigkeit des Geschützes gehört auch dem Geschoß zu und bleibt ihm als Geschwindigkeitskomponente auf seiner Bahn erhalten und bewirkt so seine Rechtsverschiebung $b\,b_1$, während es die Schiffsbreite durchsetzt. Es wäre also aus dem Schußkanal bei bekannter Schießrichtung A B nur auf Relativbewegung von Geschütz und Schiff zu schließen.

Anders ist es aber bei der Aberration des Lichtes. Beobachtungen an Doppelsonnen zeigen dies: Nur Bewegung des Beobachters quer zum Lichtstrahl bringt Aberration hervor, nicht Bewegung der Lichtquelle.

Doppelsonnen, die um ihren gemeinsamen Schwerpunkt kreisen (M 221) finden sich in großer Zahl unter den Fixsternen. Man kennt ihre Bahnen in vielen Fällen, wobei zu allermeist Dopplers-Prinzip behilflich war (spektroskopische Doppelsterne, A 92); im Fernrohr sind sie wegen der großen Entfernung meist nur als einfache Sterne sichtbar. Es sei der Kreis in Abb. 9 die gemeinsame Bahn zweier solcher (hier von gleicher Masse angenommener) Sonnen um ihren Schwerpunkt, und die Erde befinde sich in der Richtung E. Befinden sich die Sonnen in S_1 und S_2, so haben sie entgegengesetzte, quer zur Beobachtungsrichtung stehende Geschwindigkeiten. Würden diese Quergeschwindigkeiten der Lichtquellen Aberration auf der Erde geben, wie es eine Quergeschwindigkeit der Erde tut, so würden die beiden Sonnen, wegen der entgegengesetzten Richtung ihrer Geschwindigkeiten, Aberrationsverschiebungen von entgegengesetzten Richtungen zeigen, was ihre Bilder im Fernrohr merklich auseinander bringen müßte, wozu die Bahngeschwindigkeiten solcher Doppelsonnen im allgemeinen völlig groß genug sind. Der Doppelstern würde also in der Stellung S_1, S_2 — nicht in S'_1, S'_2 — besondere Trennung zeigen müssen, auch wenn er sonst im Fernrohr unauflösbar ist, und zwar würde diese Trennung gerade zu den Zeiten auftreten müssen, wo nach der sonstigen Kenntnis von dem Doppelstern (besonders nach Anzeige des Spektroskops) seine beiden Teile S_1 und S_2 am dichtesten beisammen erscheinen sollten. Alles dies widerspricht aber der Beobachtung; derlei Erscheinungen sind nicht aufgetreten, und dies ist der Nachweis für die vorangestellte Behauptung, daß Querbewegung der Lichtquelle keine Aberration gibt, die Aberration also nur als Folge der Querbewegungen des Beobachters zum Lichtstrahl auftritt[1]). Der Lichtstrahl verhält sich also

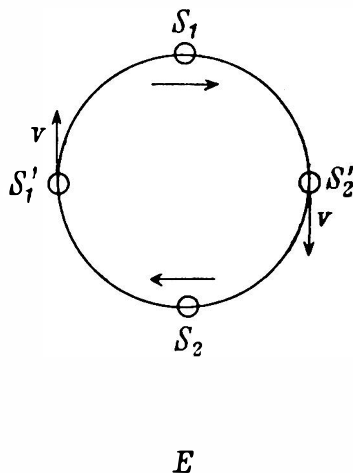


Abb. 9. Zur Belehrung durch die Doppelsonnen.

[1]) Außerdem ist das Fehlen von Aberration bei bewegter Lichtquelle durch Beobachtungen an Kanalstrahlen, d. i. an schnell bewegten leuchtenden Atomen (E 517) und somit auch bei irdischen Lichtquellen erwiesen.

zwar wie die Bahn einer trägen Masse, die ihre Bewegungsrichtung beibehält (wie das im Beispiel betrachtete Geschoß, 24); er bringt aber eine Querbewegung der Quelle nicht zum Beobachter.

Ein Mittel zur Aufdeckung von „Absolutgeschwindigkeit", etwa des ganzen Sonnensystems, kann aber die Aberration doch nicht geben. Denn obwohl eine verborgene, vorhandene Geschwindigkeit des Beobachters die Örter der Gestirne durch Aberration verschoben erscheinen lassen muß, so sind doch ihre unverschobenen Örter unbekannt. Nur Änderung der vorhandenen Geschwindigkeit der Erde nach Größe oder Richtung wird merklich (vgl. M 45, 55), und Folge einer solchen Änderung, die im Kreisen der Erde um die Sonne gegeben ist, ist eben die schon betrachtete jährliche Aberration. Es gibt auch eine tägliche Aberration, verursacht durch die tägliche Drehung der Erde, die allerdings wegen der geringen Äquatorgeschwindigkeit nur rund 0·3″ beträgt, was aber doch noch gut beobachtbar ist.

Die jährliche, wie die tägliche Drehung der Erde sind so durch die Aberrationen absolut nachgewiesen.

Man sieht, daß die Benutzung des Lichtes zur selben Erkenntnis führt, wie die Betrachtung der Bewegungen der Materie: Nur Drehbewegung, nicht fortschreitende Bewegung ist absolut erkennbar (M 46, 243).

26. Uräther. — Sehr bemerkenswert ist auch eine zweite Belehrung durch die Doppelsonnen. Man bedenke eine solche (Abb. 9) — wieder der Einfachheit halber mit gleichen Massen angenommen — in der Stellung S'_1 S'_2 zur Erde E. S'_1 entfernt sich dann mit seiner Bahngeschwindigkeit v von der Erde, während S'_2 mit derselben Geschwindigkeit sich ihr nähert. Das Licht, welches von jeder der beiden Sonnen ausgeht, läuft zunächst — nach dem auf der Erde Gefundenen zu urteilen (23) — im Äther der betreffenden Sonne und zwar mit der Geschwindigkeit c in diesem Äther. Gegen Erde ist dann die Geschwindigkeit des Lichtes von S'_1 $c-v$ und von S'_2 $c+v$. Der hiernach vorhandene Geschwindigkeitsunterschied würde beim gleichen Wege der beiden Lichter bis zur Erde einen entsprechenden Zeitunterschied der Ankunft dieser Lichter ergeben, und zwar könnte dieser Zeitunterschied bei den sehr großen Abständen der meisten Doppelsterne leicht große Bruchteile der Umlaufszeit derselben betragen, wodurch die beiden Sonnen in Bahnstellungen zur Beobachtung kämen, die entsprechend ungleichzeitig sind, und zwar dies nur periodisch, weil in den Zwischenstellungen S_1 S_2 diese Wirkung fehlt. Dies würde die Bahnberechnung der Doppelsterne, deren Bahnebenen nicht gerade senkrecht zur Beobachtungsrichtung stehen, äußerst verwickelt oder unmöglich machen. Derartiges ist aber nicht vorgekommen; vielmehr sind die Bahnen vieler und weit entfernter Doppelsterne einwandfrei ohne Eintreten solcher Schwierigkeit berechenbar gewesen. Daraus folgt, daß die gegen Erde ursprünglich verschiedenen Geschwindigkeiten der beiden Lichtstrahlen unterwegs bald sich ausgleichen müssen. Das Stattfinden einer solchen Ausgleichung zeigt in einfachster Auffassung an, daß die Äther der beiden Sonnen nicht weit in den Raum hinaus für die Ausbreitungsgeschwindigkeit bestimmend sind (22), sondern daß der größte Teil des Abstandes des Doppelsterns bis zur Erde von einem anderen, den beiden Lichtstrahlen gemeinsamen Äther erfüllt ist. Wir nennen diesen Äther des Himmelsraums „Uräther".

Wie weit in den Uräther hinein, diesen in der Lichtgeschwindigkeitsregulierung ersetzend, die Äther der einzelnen Himmelskörper sich erstrecken, ist unbekannt. Man könnte vermuten, daß diese Erstreckung so weit merklich ist, wie die Gravitationswirkung der betreffenden einzelnen Körper merklich ist. Es könnte der Uräther die Gesamtheit der Ätheranteile der fern abstehenden, im ganzen Himmelsraum verteilten Massen sein.

Jedenfalls sieht man hier wieder, daß die Geschwindigkeit des Lichtes nicht durch vorhandene Geschwindigkeiten der Lichtquelle beeinflußt wird, seien dieselben längs oder quer (25) zum Strahl gerichtet, sondern daß das Licht sich unabhängig davon einrichtet, wie es einer Welle zugehört (vgl. auch A 92, E 519).

Die aus dem Uräther kommenden Lichter der Fixsterne sind es, an welchen Aberration (24) gut beobachtet und gemessen ist, und dies ist — wie schon bemerkt — der Nachweis dafür, daß diese Lichter keine Querbewegung vom Äther der Erde annehmen, den sie durchsetzen.

In Längsbewegung dagegen richtet sich das aus dem Uräther kommende Licht — nach dem Ausfall besonderer Versuche (138) — relativ zum Erdäther ein. Es ist hier die beim Übergang von einem Äther in einen anderen, anders bewegten, zu erwartende Geschwindigkeitsänderung des Lichtes, entsprechend der Geltung der Lichtgeschwindigkeit c stets relativ zum Äther des Ortes (23), als nachgewiesen zu betrachten.

Lichter irdischer Quellen zeigen keine Aberration, die der täglichen oder jährlichen Bewegung des Beobachters im Sonnensystem entspräche, was dem Nichtvorhandensein von Querbewegung des Beobachters gegenüber dem Lichtstrahl entspricht, indem beide hier immer nur im Erdäther sind, der an Erde ruht.

27. Lichtverspätungen im Himmelsraum. — Da die Materie fernster Gestirne von gleicher Art sich zeigte, wie die Materie auf Erden (91), ist wohl anzunehmen, daß auch der Äther (und Uräther) in fernsten Teilen des Himmelsraums nicht wesentlich verschieden ist vom Äther des Sonnensystems, so daß — mangels anderen Wissens — zu Recht mit der gleichen Lichtgeschwindigkeit c im ganzen Himmelsraum gerechnet werden kann.

Die Abstände im Himmelsraum[1]) sind so groß, daß die Laufzeiten des Lichtes — Lichtverspätungen — von Gestirn zu Gestirn trotz der sehr großen Geschwindigkeit c sehr erheblich sich ergeben. Von der Sonne bis zur Erde sind rund 8 Minuten Lichtzeit, bis zu Neptun rund 4 Stunden. Alle Gestirne außerhalb des Sonnensystems sind so weit ab, daß die Lichtverspätung von dort bis zur Erde mindestens Jahre beträgt. Man gibt so große Abstände zweckmäßig in Lichtjahren an, deren eines rund 10^{13} km ist. Selbst der nächste Fixstern („Proxima" im Centauren) ist 4·3 Lichtjahre entfernt, viele der hellsten Sterne 10, 100 und mehr Lichtjahre; ja es sind innerhalb des Milchstraßensystems Abstände bis zu 10000 oder 20000 Lichtjahren ermittelt. Bei den zahlreichen Spiralnebeln (M 226, 233) ergeben sich Millionen von Lichtjahren; sie bilden demnach besondere Systeme außerhalb des Milchstraßensystems, dem unser Sonnensystem zugehört.

Es ist dabei immer zu bedenken, daß wir die Gestirne nicht an den Stellen und nicht in den Zuständen sehen, wo und wie sie jetzt sind, sondern wo und wie sie waren, als das Licht von ihnen abging, das jetzt an uns vorbeizieht. Manche könnten bei den langen Laufzeiten längst erloschen sein; sie müssen immer noch sichtbar bleiben, solange Lichtwellen von ihnen zu uns unterwegs sind.

Von Fixsternabstand aus gesehen würde das Licht sehr langsam laufen. Leuchtet z. B. ein 10 Lichtjahre entfernter Stern plötzlich auf und erleuchtet er dadurch dunkle Himmelskörper, so würde es von der Erde aus gesehen etwa einen Monat dauern, bis diese mit der Geschwindig-

[1]) Die zuverlässigsten Abstandsmessungen werden durch „Parallaxen"-Beobachtung ausgeführt, wobei die Annahme geradlinigen (oder doch innerhalb eines halben Jahres nicht verschieden gekrümmten) Laufes der Lichtstrahlen maßgebend ist. Bei den allermeisten Gestirnen ist aber der Abstand zu groß für die Anwendung dieser Methode; sie geben keine gesichert meßbaren Parallaxen (schon 326 Lichtjahre Abstand geben nur 0·01″ Parallaxe). Es treten dann andere, weniger einfach begründete Methoden ein, die aber nach längerer Entwicklung doch ziemlich gesichert erscheinen.

keit c sich ausbreitende Erleuchtung der Umgebung eine Vollmondsbreite weit fortgeschritten wäre. Erscheinungen von Erleuchtungs-Ausbreitung, die solche Deutung zulassen, sind beobachtet; doch sind die Raumabmessungen in jenen Fernen nicht genügend bekannt um einen Schluß auf die dort obwaltende, vielleicht doch von c verschiedene Lichtgeschwindigkeit zu ermöglichen.

c) Zurückwerfung (Reflexion) des Lichtes.

Wir verlassen jetzt das Studium der Lichtausbreitung im freien Äther, um die Einwirkung materieller Körper auf den Gang der Lichtstrahlen zu untersuchen.

28. Reflexionsgesetz. — Wenn Licht aus dem Äther kommend auf die Grenzfläche eines materiellen Körpers trifft, oder auch wenn es aus einem Körper an einen anderen kommt, so kehrt im allgemeinen ein Teil des Lichts an der Grenzfläche zurück; das Licht wird „reflektiert".

Grundlegend für alle Fälle ist die Reflexion an ebenen Flächen, „Planspiegeln". Jede ruhende, horizontale Wasseroberfläche war von jeher schon ein solcher Spiegel.

Um Einsicht zu gewinnen, untersucht man die Reflexion schmaler Strahlenbündel (9). Es falle ein solches, E O (Abb. 10), auf die spiegelnde Fläche F F. Man errichtet im „Einfallspunkte" O eine Senkrechte N O auf die Fläche, das „Einfallslot" oder kurz „Lot". Die durch den „einfallenden Strahl" E O und das Lot gegebene Ebene (zusammenfallend mit der Zeichnungsebene der Abb. 10) heißt die „Einfallsebene" des Strahls; der Winkel α zwischen Strahl und Lot heißt der „Einfallswinkel". Man findet dann (was schon Euklid bemerkte), daß der „reflektierte Strahl" O R vom Einfallspunkt aus stets so abgeht, daß er 1. in der Einfallsebene liegt und daß 2. sein Winkel β mit dem Lot — der „Reflexionswinkel" — gleich dem Einfallswinkel α ist. Diese beiden Sätze bilden das Reflexionsgesetz (Spiegelungsgesetz), das Auskunft über alle vorkommenden Fälle der Zurückwerfung des Lichtes gibt, soweit nur Fragen des Strahlenlaufes gehen.

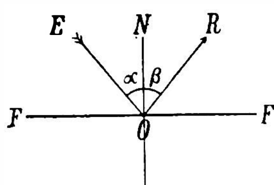


Abb. 10. Lichtreflexion.

29. Bilder ebener Spiegel. — Viel genauer als es durch unmittelbare Winkelmessung an Strahlenbündeln möglich wäre wird das Reflexionsgesetz geprüft mittels der Bilder, welche ebene Spiegel geben.

Es sei A (Abb. 11) ein leuchtender Punkt vor der spiegelnden Ebene F F. Ein senkrecht einfallender Strahl A O geht nach dem Reflexionsgesetz in sich selbst zurück; ein anderer Strahl A O_1 geht nach O_1R, so daß $\alpha = \beta$. In dieser Weise können auch die anderen vom Spiegel zurückgehenden, von A stammenden Strahlen gezeichnet werden. Man sieht, daß sie alle so vom Spiegel weglaufen, als wären sie vom Punkte B hinter dem Spiegel gekommen, und zwar liegt B so weit hinter dem Spiegel als A davor. Daß dies nach dem Reflexionsgesetz der Fall sein muß, zeigt die Kongruenz der beiden Dreiecke O O_1 A = O O_1 B (O O_1 gemeinsam und die beiden

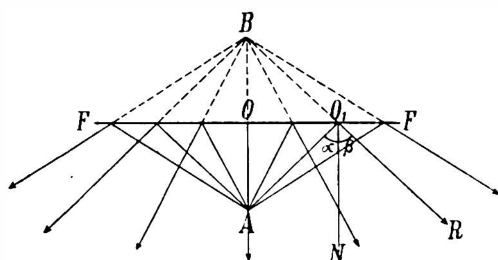


Abb. 11. Bild an ebenem Spiegel.

anliegenden Winkel gleich, die einen 90° die anderen weil $\alpha = \beta$). Derentwegen muß $OA = OB$ sein. Da aber AO_1 ein beliebig ausgewählter Strahl war, gilt es für alle nach dem Gesetz reflektierten Strahlen, daß sie von diesem Punkte B divergieren müssen, der ebenso weit hinter dem Spiegel liegt als A davor[1]).

Fängt ein Auge irgendeinen Teil der von B divergierenden Strahlen auf, d. h. sieht es in den Spiegel, so kann es keinen anderen Eindruck haben, als welchen ein in B befindlicher leuchtender Punkt ihm geben würde; denn alle Wirkung von Licht auf das Auge hängt nur von Richtung und Art des Lichtbündels ab, welches das Auge trifft. Das Auge ist auch so fein eingerichtet (64) und der gleichzeitige Gebrauch beider Augen auch so fein geübt, daß trotz der Schmalheit des in die Pupille dringenden Strahlenbündels doch dessen bestimmte Divergenz zur Wirkung kommt, und also ein A völlig gleicher Lichtpunkt in B gesehen wird. B ist daher ein Bild (12) von A.

Da zu diesem Bilde B hinter dem Spiegel gar kein Licht läuft, so kann es auch — anders als das Lochkammerbild (12, Abb. 3) — auf keinem Schirm aufgefangen werden; nur vor dem Spiegel ist der zu B gehörige Strahlenlauf vorhanden, ein Strahlenlauf, der ganz in gleicher Weise hergestellt werden könnte, wenn man den Spiegel fortließe und einen leuchtenden Punkt nach B brächte. Solche Bilder, die auf Schirmen nicht aufgefangen werden können, deren Strahlenlauf nicht an ihrem Ort sondern nur anderswo vorhanden ist, werden „virtuell" (scheinbar) genannt, im Gegensatz zu den reellen, die auf Schirmen auffangbar sind (12).

Bilder beliebig großer Gegenstände können stets Punkt für Punkt gefunden werden. Es sind daher alle Fragen der Bilder von Planspiegeln durch das Punktbild erledigt.

Man sieht leicht, daß die Bilder der Planspiegel stets von gleicher Größe sein werden wie der Gegenstand und stets virtuell.

Die völlige Schärfe dieser Bilder bei genügender Vollkommenheit der Spiegelfläche ist ein besonderer Nachweis der Gültigkeit des Reflexionsgesetzes.

30. Gekrümmte Spiegel. — An ebenen Spiegeln wird die Divergenz (oder Konvergenz) auffallender Strahlenbündel nicht geändert. Paralleles Licht beispielsweise, wie es von der Sonne oder überhaupt von fernen Lichtquellen kommt, wird als paralleles Licht reflektiert. Gekrümmte Spiegel ändern dies. Paralleles Licht kann durch Hohlspiegel konvergent gemacht, gesammelt werden.

Am einfachsten sind kugelig gekrümmte Spiegel herstellbar, die auch alles Wesentliche am einfachsten zeigen. Es werde ein solcher Spiegel (Abb. 12) mit dem Krümmungsmittelpunkt C von parallelem Licht getroffen, das in Richtung der Spiegelachse CO einfällt. Zeichnet man den Verlauf jedes Strahles nach dem Reflexionsgesetz, wobei Einfallslot jedesmal der Kugelradius ist (wie an einem der Strahlen in der Abbildung dargestellt), so erhält man einen eigentümlichen Strahlenlauf. Man sieht in der Hauptsache, daß das parallele Licht konvergent geworden, in die Gegend zwischen O und C zusammengelenkt ist, daß aber die Konvergenz nicht nach einem einzigen Punkte geht. Wohl konvergieren die der Spiegelachse OC nahen Strahlen — die „Zentralstrahlen" —

---

[1]) Die zu den Strahlen senkrecht stehenden Kugelwellen um A und B finden sich in der Akustik am Schall und an Wasserwellen betrachtet (A 34, Abb. 13 Bd. II).

nahezu zum Punkte F, der die Strecke O C, den Krümmungsradius des Spiegels, halbiert (was aus dem Reflexionsgesetz leicht einzusehen ist); aber die der Achse fernen Strahlen — die „Randstrahlen" — gehen weit näher zu O hin.

Es ist also das ursprünglich von einem Punkte (der beim parallelen Licht im Unendlichen liegt) gekommene — „homozentrische" — Licht nicht homozentrisch geblieben[1]), und da dies unerwünscht ist, bezeichnet man es als einen Fehler der Kugelspiegel, als „Kugelfehler" („sphärische Aberration"). Dieser Kugelfehler macht sich wenig merklich, wenn der Spiegel keinen allzu großen Teil der Kugel umfaßt, zu welcher er gehört, oder, was dasselbe ist, wenn nur achsennahe Strahlen, Zentralstrahlen benutzt werden. Es wird dann das von einem Punkt gekommene Licht nahezu in einem Punkt vereint, der dann das Bild jenes Gegenstandspunktes ist und zwar in diesem Falle ein reelles Bild. Daß das Bild, auf einem Schirm untersucht, nicht völlig scharf ist, sondern verwaschen umrandet, dies ist eben die Äußerung des Kugelfehlers.

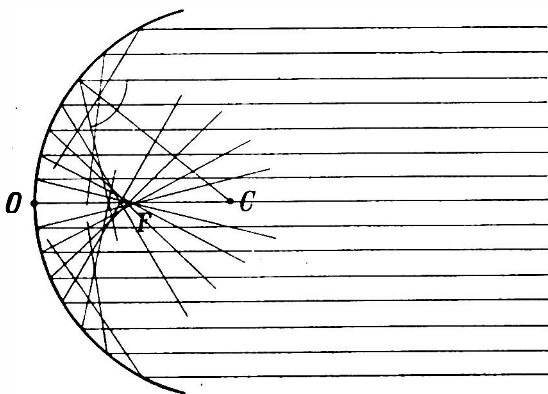


Abb. 12. Reflexion am kugeligen Hohlspiegel.

In dem in der Abbildung 12 dargestellten Falle des parallelen Lichtes wird der Bildpunkt F „Brennpunkt" (Fokus) des Spiegels genannt (weil die in F konzentrierte Energie des Lichtes bei Benutzung von Sonnenlicht entsprechend große Wärmewirkung gibt). Der Brennpunkt F halbiert den Krümmungsradius O C des Spiegels.

Kommt der leuchtende Gegenstandspunkt aus dem Unendlichen näher an den Spiegel heran, so wandert der Bildpunkt aus dem Brennpunkt gegen den Krümmungsmittelpunkt C hin. Ist der Gegenstandspunkt in C angekommen, so ist auch sein Bild dort angelangt; alle vom Gegenstandspunkt auf den Spiegel fallenden Strahlen gehen dann in sich selbst zurück; der Kugelfehler ist in diesem einen Falle verschwunden. Rückt der Gegenstandspunkt von C aus noch näher an den Spiegel, so wandert der Bildpunkt noch weiter weg vom Spiegel; er wandert bis ins Unendliche hinaus, wenn der Gegenstandspunkt bis F rückt. Jetzt laufen alle (achsennahen) Strahlen denselben Weg wie in Abb. 12, nur in umgekehrter Richtung[2]); der Spiegel gibt paralleles Licht aus (abgesehen vom Kugelfehler). Kommt der leuchtende Punkt dem Spiegel noch näher als F, so fallen die Strahlen so steil divergent auf den Spiegel, daß er sie nicht mehr konvergent machen kann; sie bleiben dann divergent, wenn auch weniger als vor dem Spiegel. Das Bild wird jetzt virtuell, wie beim Planspiegel (29), und findet sich hinter dem Spiegel.

Alles dies geht leicht aus dem Reflexionsgesetz hervor; und aus der Kenntnis der Bilder von Punkten folgt auch leicht alles, was Bilder von beliebigen Gegenständen betrifft, wobei auch immer die Frage der Größe und des Aufrecht- oder Verkehrt-Stehens der Bilder vorliegt. Da alle hierbei auftretenden Besonderheiten bei den Bildern von Linsen in nahe verwandter Weise, doch mit erweiterten Zutaten und in noch wichtigeren Anwendungen wiederkehren (57 u. f.), unterlassen wir es, hier näher darauf einzugehen.

31. Parabolische und elliptische Hohlspiegel. — Was den Kugelfehler

---

[1]) Bei Planspiegeln bleibt homozentrisches Licht immer homozentrisch (vgl. Abb. 11).

[2]) Es ist überhaupt ein allgemein gültiger, aus dem Reflexionsgesetz unmittelbar folgender Satz, daß Licht bei Reflexion hin und zurück denselben Weg geht.

anlangt, so ist aus geometrischer Kenntnis zusammen mit dem Reflexionsgesetz leicht zu sagen, daß er beseitigt werden kann, wenn man die Kugelform verläßt. Ein parabolischer Spiegel würde achsenparallele Strahlen genau in dem Punkt vereinigen, welchen man deshalb bei der Parabel auch Brennpunkt heißt; ebenso wirkt er als fehlerfreier „Scheinwerfer", wenn die punktförmige Lichtquelle im Brennpunkt sich befindet. Ein innen spiegelndes Ellipsoid würde alle Strahlen, die aus dem einen Brennpunkt der erzeugenden Ellipse kommen, genau im andern Brennpunkt vereinigen (vgl. W, Abb. 76). Man sieht daraus, daß eine Spiegelform, die für alle Lagen des leuchtenden Punktes oder Gegenstandes scharf abbildend wirkte, nicht möglich ist.

32. Konvexspiegel (erhabene Spiegel) geben — wie leicht einzusehen — nur virtuelle Bilder.

33. Rauhe Grenzflächen, wie z. B. mattgeschliffene Glasoberflächen, zerstreuen das Licht allseitig, „diffus". Auch dies folgt aus dem Spiegelungsgesetz, wenn man es auf jeden einzelnen auffallenden Strahl anwendet, wobei Einfallslot stets die im Einfallspunkt auf das dort befindliche Flächenstück errichtete Senkrechte ist (die Flächen-Normale)[1]). Abb. 13 zeigt dies an einer

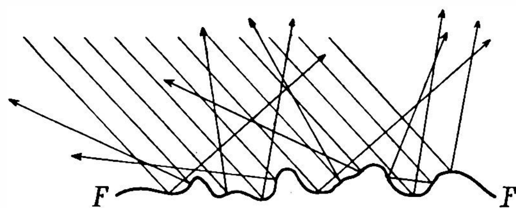


Abb. 13. Reflexion an rauher Fläche.

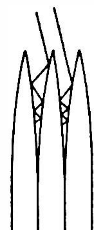


Abb. 13a. Reflexion an Nadelbündel.

stark vergrößert gezeichneten rauhen Oberfläche FF (wobei allerdings alle Flächennormalen in der Zeichnungsebene angenommen sind). Man sieht ein, daß schon ein sehr kleines Stück einer sehr rauhen Oberfläche allseitig zerstreuend wirken muß, so daß das gesamte weggehende Licht nicht homozentrisch ist. Der Strahlenlauf von nicht zu kleinen Teilen einer solchen Oberfläche ist derselbe, wie wenn die Fläche an den von Licht getroffenen Stellen selbstleuchtend wäre, was wir schon voraus hervorgehoben haben (11). Solche Flächen, wie mattes Glas oder Papier, werden als auffangende Schirme benutzt, um reelle Bilder allseitig sichtbar zu machen[2]).

Dabei ist zu bemerken, daß die allermeisten Stoffe, wie Papier, Leinwand, Holz, Farbstoffe usw. nicht nur an der äußeren Grenzfläche gegen Luft reflektieren, sondern auch noch von innen heraus einen Teil des eindringenden Lichtes zurückwerfen, da sie von gemischter Beschaffenheit, meist sogar luft-

---

[1]) Die Grenzen der geradlinigen Ausbreitung (18) bedingen es, daß Rauhigkeiten von kleinerer Abmessung als Lichtwellenlänge nicht wie oben betrachtet werden dürfen (144). So haben z. B. die besten Spiegel ihre molekularen Unebenheiten und wirken doch keineswegs allseitig zerstreuend, sondern wie vollkommen eben, ganz so wie es sehr grobrauhe Flächen für die langen Schallwellen tun (A 36).

[2]) Daß rauhe Grenzflächen auch beim Durchgang des Lichtes allseitig zerstreuend wirken, wie Mattglas oder Seidenpapier, ist aus dem Brechungsgesetz leicht einzusehen.

haltig sind und also innen viele weitere reflektierende Grenzflächen haben (vgl. 36).

Elektrolytisch rauh abgeschiedene Silberflächen bieten ein Beispiel sehr vollkommener und zugleich vollkommen diffuser Reflexion an der einzigen, äußeren Grenzfläche gegen Luft; sie erscheinen sehr hell weiß. Andere lichtundurchlässige rauhe Flächen, wie die meisten Metallpulver, reflektieren nicht so viel; sie erscheinen grau. Nach außen spitze Formung der Grenzfläche solcher undurchsichtiger Körper kann sogar die Reflexion fürs Auge ganz unwirksam machen, so daß die Grenzfläche vollkommen schwarz erscheint, weil sie gar kein Licht zurückgibt. Abb. 13a zeigt dies an einem Bündel feiner Nähnadeln, deren hell beleuchtete Spitzenoberfläche so dunkel erscheint wie schwarzer Samt, indem alles von den blanken Stahloberflächen reflektierte Licht durch wiederholte Reflexionen zunehmend geschwächt ins Innere gelenkt wird, so daß keines nach außen zurückkommt.

d) Brechung des Lichtes.

Die Zurückwerfung des Lichtes an Körpergrenzflächen ist im allgemeinen unvollständig. Nur ein Teil der Energie des Lichtes wird zurückgeworfen; der andere Teil durchschreitet die Grenzfläche als „gebrochener" Strahl. Es wird nämlich bei jeder Durchschreitung einer Grenzfläche die Strahlrichtung mehr oder weniger abgeändert und zwar sprungweise an der Grenzfläche selbst, und man nennt dieses die „Brechung des Lichtes".

34. Brechungsgesetz. — Es sei (Abb. 14) FF die durchstrahlte Grenzfläche, oberhalb derselben etwa Luft, unterhalb Wasser. EO sei ein einfallender Strahl; NON ist dann das Einfallslot, α der Einfallswinkel (28). Der gebrochene Strahl OG schließt einen anderen Winkel β mit dem Lot ein, „Brechungswinkel" genannt, und zwar ist in dem gewählten Beispielsfalle $\beta < \alpha$. Man sagt in solchem Falle, daß „Brechung zum Einfallslote" stattgefunden habe, weil der gebrochene Strahl OG näher dem Lote N liegt als die geradlinige Fortsetzung OE′ des einfallenden Strahls.

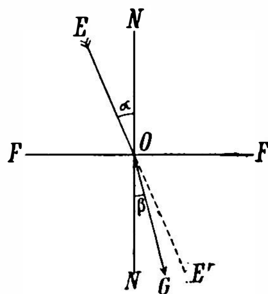


Abb. 14. Lichtbrechung.

Es sei sogleich bemerkt, daß auch Brechung vom Einfallslote vorkommt; doch ist dies nur die Umkehrung des betrachteten Falls. Das Licht geht nämlich bei der Brechung — ganz wie bei der Zurückwerfung — zurück wie hin denselben Weg; fällt ein Strahl GO aus dem Wasser in die Luft hinaus, so wird er in der Richtung OE, also vom Lot weg gebrochen. Einfallswinkel und Brechungswinkel haben dann nur ihre Benennung vertauscht, sind aber von gleicher Größe geblieben. Man sieht daraus, daß die beiden Brechungsfälle auf einen zurückgehen, und es genügt, diesen weiter zu betrachten.

Zu jedem Paare von aneinander grenzenden Stoffen, auch „Medien" genannt (vgl. A 3) — wobei der leere Raum, der bloße Äther, auch mit einbegriffen ist —, gehört eine gewisse Stärke der Brechung, die aber außerdem von der Größe des Einfallswinkels abhängig ist. Das aus der Erfahrung — aus Winkelmessungen in einzelnen untersuchten Brechungsfällen — entnommene

Brechungsgesetz, welches bei gegebenem Stoffpaar erlaubt, zu jedem Einfallswinkel α den zugehörigen Brechungswinkel β anzugeben, lautet

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n, \tag{34}$$

d. h.: Das Verhältnis des Sinus des Einfallswinkels zum Sinus des stets in der gleichen Ebene liegenden Brechungswinkels ist für alle möglichen Strahlrichtungen eine konstante, zum Stoffpaare gehörige Zahl n (Snell 1620).

35. Brechungsexponent. — Diese Zahl n, welche durch Ausmessung eines Brechungsfalles an dem Stoffpaar selbst ermittelt werden muß, wird der Brechungsexponent oder Brechungskoeffizient des Stoffpaares oder der beiden Stoffe gegeneinander genannt. Die Kenntnis dieser Zahl erlaubt nach dem Gesetz die Vorausberechnung aller beliebigen Brechungsfälle an dem Stoffpaar.

Ist auf der einen Seite der Grenzfläche leerer Raum (bloßer Äther), so gehört n nur dem einen Stoffe zu, an welchem die Brechung stattfindet, und wird dann kurz der Brechungsexponent dieses Stoffes genannt. Wir werden gewöhnlich diesen Fall voraussetzen, sowohl weil die Luft in Hinsicht der Lichtbrechung nur sehr wenig vom bloßen Äther sich unterscheidet, als auch weil — wie später ersichtlich wird (43) — leicht vom leeren Raum auf Luft umgerechnet werden kann, falls das erforderlich schiene: Man hat nur den auf leeren Raum bezogenen Exponenten durch den Exponenten der Luft zu dividieren, und es ist überhaupt der Brechungsexponent zweier Stoffe gegeneinander durch den Quotienten der beiden Einzelexponenten gegeben.

Der Brechungsexponent n — oder besser: sein Überschuß über 1 — ist das Maß der Brechungsstärke des betreffenden Stoffes. n = 1 würde $\alpha = \beta$, also Fehlen von Brechung bedeuten; dies ist die geringste mögliche Brechungsstärke. Je größer n — 1 ist, desto mehr wird $\beta < \alpha$ sein, desto stärker also die Brechung.

Tab. 36. **Brechungsexponenten** (bezogen auf den leeren Raum).

	Rot A	Grün E	Indigo G
Luft	1·00029	1·00030	1·00031
Wasser	1·330	1·336	1·345
Kronglas	1·570	1·579	1·587
Flintglas 1	1·761	1·789	1·818
„ 2	1·563	1·576	1·588
Schwefelkohlenstoff	1·62	1·64	1·70
Diamant	2·46	2·48	2·50

Tab. 36 gibt die Brechungsexponenten einiger bemerkenswerter Stoffe[1]) an. Man sieht, daß sie sich zwischen 1 und etwa 3 bewegen; Diamant ist einer der stärkst lichtbrechenden durchsichtigen Körper.

[1]) Auf die oben in der Tabelle vermerkten Farben gehen wir später ein (47); es genügt für jetzt, die Zahlen für Rot zu betrachten. Die Buchstaben A, E, G bezeichnen bestimmte Spektralstellen (49) durch Fraunhofer's Linien (91).

Stoffe mit vergleichsweise größerem Brechungsexponenten nennt man auch „optisch dichter", solche mit kleinerem Exponenten „optisch dünner". Mit der Dichte oder dem spezifischen Gewicht (M 125, 70) hat diese verkürzte Angabe für Brechungsexponenten-Unterschiede nichts zu tun, obgleich, wie man aus der Tabelle sieht, in vielen Fällen bei höherer Dichte auch stärkere Lichtbrechung sich findet.

Beim Übergang von einem optisch dünneren in einen optisch dichteren Stoff findet Brechung zum Lot statt, im umgekehrten Fall vom Lot (vgl. 43).

Auf vorteilhafte besondere Meßweisen von Brechungsexponenten gehen wir gelegentlich ein (2. Note zu 36, 44).

36. Totale Reflexion. — Wir betrachten nun die verschiedenen, je nach dem Einfallswinkel möglichen Fälle von Lichtbrechung an gegebenem Stoffe. Sie sind in Abb. 15 entsprechend dem Brechungsgesetz gezeichnet, wobei gleiche Zahlen immer zusammengehörige Strahlen bezeichnen; oben ist der optisch dünnere, unten der optisch dichtere Stoff angenommen. Ist der Einfallswinkel $\alpha = 0^0$, so muß auch $\beta = 0^0$ sein (weil nur 0/0 gleich einer endlichen Zahl, dem Brechungsexponenten, sein kann); d. h. bei senkrechtem Einfall fehlt die Brechung, wie groß auch der Brechungsexponent sei (Strahl 1 der Abbildung). Je schiefer der Einfall, desto mehr tritt die Brechung hervor (Strahlen 2, 3). Am stärksten ist sie bei „streifendem Einfall", d. i. bei $\alpha = 90^0$; es ist dann $\sin\beta = 1/n$ (Strahl 4).

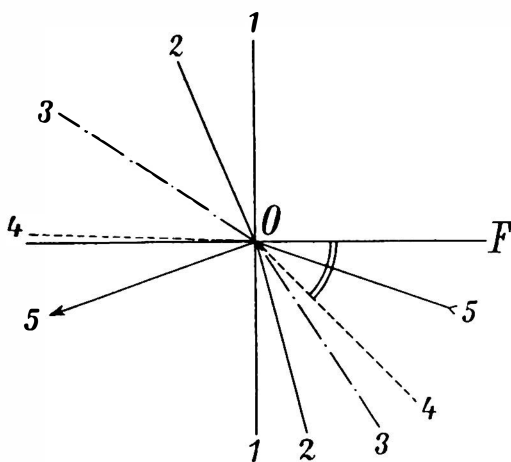


Abb. 15. Verschiedene Fälle der Brechung (und totale Reflexion).

Da für die umgekehrte Strahlrichtung dieselben Winkel gelten, so sieht man aus der Abbildung gleichzeitig alle möglichen Fälle von Brechung sowohl zum als vom Einfallslot, je nachdem der Strahl aus dem (in der Abbildung oben befindlichen) optisch dünneren oder aus dem (unten befindlichen) optisch dichteren Stoff kommt.

Dabei fällt auf, daß kein irgendwie gerichteter, von oben kommender Strahl jemals in den (besonders bezeichneten) Winkel 4 OF gelangt: Es ist nicht möglich, einen Strahl aus dem optisch dünneren Stoff in den optisch dichteren innerhalb dieses Winkels von O aus hineinlaufen zu lassen. Ganz entsprechend kann aber auch ein von unten — von der optisch dichteren Seite — her so schräg, innerhalb dieses Winkels, kommender Strahl nicht an die optisch dünnere Seite hinüber gelangen[1]); er kann daher nur zurückgeworfen werden, und zwar muß dies, da es ohne Energieabgabe an einen weitergehenden Strahl stattfindet, mit voller, unverminderter Inten-

[1]) Das Brechungsgesetz sagt dies dadurch, daß bei $\beta >$ arcsin (1/n) $\sin\alpha > 1$, also α imaginär wird.

sität geschehen. Man nennt dies die totale Reflexion zum Unterschied von der nur teilweisen Reflexion, welche der allgemeine Fall ist, entsprechend der gewöhnlich eintretenden Teilung der Energie in einen reflektierten und einen weitergehenden Strahl. Bei der totalen Reflexion fehlt diese Teilung; solche Reflexion findet aber, wie wir sehen, nur an der Grenze gegen ein optisch dünneres Medium hin statt und auch da nur bei genügend schiefem Einfall, so daß $\sin\beta > 1/n$[1]).

Am günstigsten für totale Reflexion sind hiernach Grenzflächen optisch dichter Stoffe gegen leeren Raum oder Luft. Totale Reflexion an Luft kommt bei durchsichtigen Stoffen mit Lufteinschlüssen mannigfach vor; eingedrungenes Licht wird an wiederholt, und häufig genügend schief, getroffenen inneren Luftgrenzen mit voller Intensität diffus herausreflektiert. Das helle Weiß des Papiers, des Schnees, der Lilien und anderer Blüten, der Haare im Alter, beruht auf solcher inneren totalen Reflexion.

Auch in optischen Geräten wird totale Reflexion oft benutzt, wenn der Weg von Lichtstrahlbündeln möglichst ohne Lichtverlust abgeändert werden soll (vgl. 65). Meist werden rechteckige Glasprismen verwendet (Abb. 16b); die totale Reflexion findet bei b an der Grenze gegen Luft statt; die Lichtverluste durch unerwünschte Reflexionen bei a und c sind gering (37). Wird dasselbe Prisma vergleichsweise anders benutzt (Abb. 16a), so bemerkt man die dann viel schwächere Reflexion am dichteren Medium; das meiste Licht geht hier ins Glas und dann weiter durch, wie es die Abbildung zeigt.

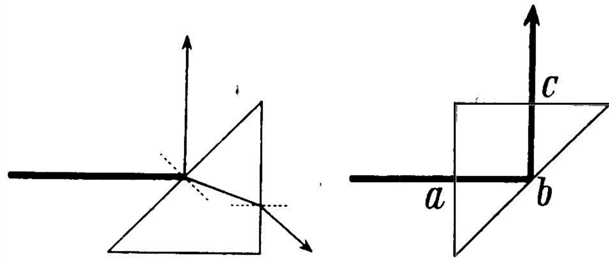


Abb. 16a gewöhnliche und 16b totale Reflexion an Prisma.

37. Die Menge des reflektierten Lichtes bei der gewöhnlichen Reflexion hängt ebenfalls mit dem Brechungsexponenten zusammen und wächst mit demselben; außerdem steigt sie mit dem Einfallswinkel. Ist n der Brechungsexponent des Stoffpaares, so ist der reflektierte Bruchteil der Intensität bei senkrechtem Einfall gegeben durch $(n-1)^2/(n+1)^2$ (siehe 176), was beispielsweise bei Glas in Luft ($n = 1{\cdot}5$) 0·04 ist, bei Diamant ($n = 2{\cdot}5$) 0·18.

Stoffe mit gleichem Brechungsexponenten, die also gegeneinander überhaupt keine Brechung geben ($n = 1$), geben auch keine Reflexion — so z. B. Glas in Zedernöl —; ihre Grenzfläche hat daher überhaupt keinen Einfluß auf das Licht und ist daher unsichtbar.

Stark lichtabsorbierende Körper — wie Farbstoffe, Metalle — geben stets auch abnorm starke Lichtbrechung und zeigen daher auch starke Reflexion, „Metallglanz" (s. 88).

e) Erklärung der Reflexion und der Brechung von Wellen.

Licht ist — wie wir voranstellten — ein Wellenvorgang. Es ist nun zu zeigen, wie die Reflexion und Brechung aus dieser Beschaffenheit des Lichtes verständlich wird. Die Reflexion mit ihrem Gesetze ließe sich auch ohne Bezugnahme

---

[1]) Man bemerkt, daß die leicht ausführbare Aufsuchung des Grenzwinkels der totalen Reflexion oder, was dasselbe ist, die Benutzung streifenden Einfalls, wobei $\sin\beta = 1/n$ wird, ein einfaches Mittel zur Messung von Brechungsexponenten ist („Totalreflektometer", „Refraktometer").

auf Wellen verstehen, wenn man den im Lichtstrahl mit Lichtgeschwindigkeit bewegten Energiemassen (E 434) die Eigenschaft der Reflexion nach Art vollkommen elastischer Körper (M 281) zuschriebe[1]). Aber schon die Fragen der Intensität der Reflexion (37) werden so nicht ohne weiteres lösbar, während sie mit Berücksichtigung der Wellen eine staunenswert eingehende Behandlung erfahren haben (176). Die Brechung und noch mehr die Doppelbrechung (41, 187) werden mit allen ihren Eigentümlichkeiten — besonders auch den Einfluß der Farbe betreffend (88) — überhaupt nur bei Berücksichtigung der Wellenform der Energie verständlich. Dabei ergab sich früh schon eine Angabe über die Lichtgeschwindigkeit in den brechenden Körpern, die bei Nachmessung bestätigt ist, was schon ohne Zuhilfenahme der Hauptnachweismittel der Wellen — Interferenz und Beugung — eine gute Sicherung der Wellennatur des Lichtes bedeutete (42).

38. Huygens' Prinzip. — Um den Lauf von Wellen bei ihrem Zusammentreffen mit allerlei Stoffen und Hindernissen vorauszusagen, ist eine allgemeine Einsicht über Wellen erforderlich. Diese ist gegeben in Huygens' Prinzip (1676), einem für Wellen aller Art geltenden Satz, der folgendes besagt:

Kennt man den Lauf einer Welle bis zu einer gegebenen Fläche hin, so erfährt man den weiteren Lauf, wenn man jeden von der Welle getroffenen Punkt der Fläche als neuen Wellenmittelpunkt betrachtet, all die Einzelwellen von diesen Punkten aus sich entwickeln läßt, und eine alle gleichzeitigen Fronten dieser Wellen gemeinsam berührende Fläche zieht; diese Fläche ist die neue Wellenfront.

Wellenfront oder Wellenfläche bedeutet dabei eine Fläche — eine dünne Schicht — gleichen Schwingungszustandes, d. h. eine Fläche, welche alle benachbarten Punkte gleichen Schwingungszustandes in sich faßt (vgl. A 5). Schwingungszustand oder Phase (vgl. M 164, A 5) ist irgendeiner der Zustände, welche in der Welle vorkommen. Diese Zustände sind je nach der Art der Welle sehr verschiedenartig. In der Wasserwelle sind es Berg und Tal, in der Schallwelle Verdichtung und Verdünnung, in der Ätherwelle (elektromagnetischen Welle, Lichtwelle) hin- und hergerichtete elektrische (und magnetische) Kraft (3), — jedesmal samt allen zugehörigen Zwischenzuständen. Das Besondere von Huygens' Prinzip ist, daß es für alle Arten von Wellen gleichmäßig gilt.

Die Ausbreitung der Welle besteht in dem Vorrücken der Wellenfront; die Richtung, in welcher dies geschieht, ist der Strahl (9). Ein Wellenzug (vgl. A 5) hat eine regelmäßige Folge von Wellenfronten abwechselnd entgegengesetzter Phase in Abständen von je ½ Wellenlänge. Im einfachsten Falle allseitig gleichförmiger Ausbreitung einer Welle ist die weglaufende Wellenfront eine Kugelfläche; der Strahl ist ihr Radius. Die Wellenfront, oder in einem Wellenzug die Folge von Wellenfronten, ist das wirklich Dahinlaufende; der Strahl gibt nur die Laufrichtung, den Reiseweg, der in der Wellenfront sitzenden Energie der Welle an. Man kann eine einzelne, abgesonderte mehr oder weniger dünne Wellenfront haben (z. B. in der einem kurzen Knall entsprechenden Schallwelle); einen einzelnen Strahl als Elementarbestandteil eines beobachtbaren Strahlenbündels (8, 9) kann man nicht aussondern (18, 144). Dementsprechend beziehen sich auch die Aussagen von Huygens' tiefgehendem Prinzip auf die Wellenfronten; der Strahl ergibt sich dann von selbst.

39. Erläuterungsbeispiel und Beweis. — Zur Verdeutlichung der Anwendung des Prinzips und zur Erläuterung seines einfachen Sinnes sei folgender einfachste Fall betrachtet. Ein Punkt Q (Abb. 17) sei Quelle räumlich sich ausbreitender Wellen irgendwelcher Art. Es sei bekannt, daß

---

[1]) Diese Eigenschaft haben die Energiemassen in der Tat in Gestalt der Atome, die bei ihrer Wärmebewegung wie vollkommen elastische Körper aneinander reflektiert werden (W 32).

in gewissem Augenblick eine Wellenfront bis an die Kugelfläche F F gekommen ist. Will man die weitere Ausbreitung der Welle von dieser Fläche aus bis zu einer späteren Zeit ermitteln, so zieht man im Sinne von Huygens' Prinzip alle die Einzelwellen, die bis zu jener Zeit von allen Punkten der Fläche F F aus entstünden, und sucht ihre gemeinsame Berührungsfläche. Sie ist die Kugel F' F', und dies wird also die neue Wellenfront sein. Man sieht, daß die Zuhilfenahme des Prinzips in diesem Falle überflüssig ist, weil es ohne weiteres feststeht, daß die Wellenfront F F bis zu jener Zeit nach F' F' gekommen sein wird.

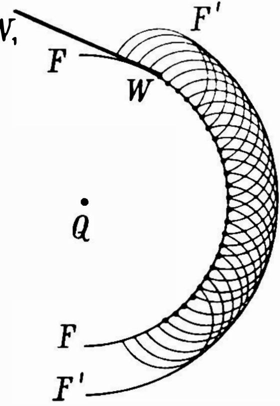


Abb. 17. Zu Huygens' Prinzip.

Der besondere, unersetzliche Wert des Prinzips wird bei den verwickelten Anwendungen ersichtlich (40, 41, 140 u. f., 187); das einfache Beispiel zeigt aber am besten das Wesentliche des Prinzips. Der Nachweis seiner Richtigkeit liegt im Zutreffen seiner Folgerungen bei den soeben angemerkten vielseitigen Anwendungen. Doch enthält das Prinzip auch nur Annahmen, die nach aller Kenntnis von Wellen — seien es Wasser- oder Schallwellen — nahezu selbstverständlich sind: Es ist Eigenart von Wellen, daß jeder getroffene Mediumsteil als neuer Erreger gleicher Wellen wirkt (A 3, 4), auch daß die Welle, ohne ein neues Medium zu treffen, nur weiter voran und nicht auch zurückläuft (A 7), und es ist auch zu erwarten, daß Einzelwellen ihre Wirkungen dort summieren werden, wo sie mit gleicher Laufrichtung und gleicher Phase einander überlagern, d. i. an der gemeinsamen Berührungsfläche. Alles dies faßt das Prinzip in Verallgemeinerung für alle Wellen zusammen. Daß die Einzelwellen an allen anderen Stellen bei freier Ausbreitung einander vernichten — durch Interferenz —, dies kann bei Wellenzügen (A 5) durch eine eingehende Überlegung nachgewiesen werden, die wir bei Erläuterung der Beugung bringen (142).

40. Reflexion von Wellen. — Wir betrachten das Herankommen einer Wellenfront in beliebiger Neigung an eine ebene Grenzfläche F F (Abb. 18). Die Wellenfront 0 A sei eben, das zu ihr gehörige Strahlenbündel also parallel, so daß wir es mit einem Strahlenbündel von bestimmtem Einfallswinkel zu tun haben. Die herankommende Wellenfront trifft die Grenzfläche der Reihe nach in den 5 Punkten 0, 1, 2, 3, 4, denen auch noch gleichgelegene Punkte vor und hinter der Zeichenebene zugehören, entsprechend der Breite des betrachteten Strahlenbündels. Diese Punkte sind im Sinne von Huygens' Prinzip als neue Wellenmittelpunkte zu betrachten und zwar für beide anein-

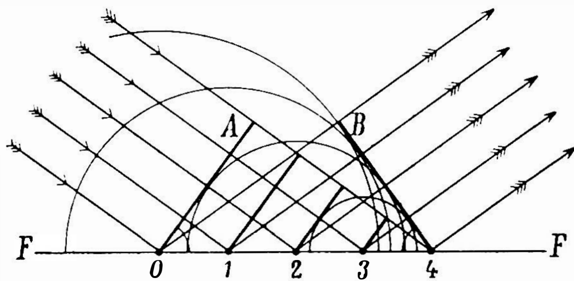


Abb. 18. Reflexion einer Welle.

ander grenzende Medien, da sie beiden zugehören. Es kommt dabei auf die Einzelwellen an, die diese Punkte in der Zeit aussenden, während welcher der herankommende Strahl den Weg von A bis 4 zurücklegt; denn in dieser Zeit verschwindet die alte Wellenfront 0 A vollständig, und es soll die nachher vorhandene, neue Wellenfront ermittelt werden.

Wir betrachten hier die Einzelwellen im ersten Medium (Abb. 18). Punkt 0 wird in der besagten Zeit eine Kugelwelle mit dem Radius 0B = A4 aussenden, da die Ausbreitungsgeschwindigkeit im gleichen Medium nach allen Richtungen dieselbe ist; zu den Punkten 1, 2, 3, welche der Reihe nach später auszusenden beginnen, gehören entsprechend kleinere Kugelwellen, und Punkt 4, für welchen keine Aussendungszeit übrig ist, hat den Kugelradius Null. Die gemeinsame Berührungsfläche all der Einzelkugeln ist das Stück Ebene B4. Dies wird also die neue Wellenfront sein, und senkrecht zu ihr steht der neue, der reflektierte Strahl.

Man sieht die Kongruenz der beiden rechtwinkligen Dreiecke 0 4 A und 0 4 B (wegen Gemeinsamkeit der Hypothenuse und Gleichheit der Katheten A4 = B0); es müssen also die entsprechenden Winkel einander gleich sein: $\sphericalangle$ A 0 4 = $\sphericalangle$ B 4 0. Auf den Schenkeln dieser Winkel stehen aber die Schenkel von Einfalls- und Reflexionswinkel des Strahls senkrecht, so daß auch diese Winkel einander gleich sind. Damit ist das Reflexionsgesetz aus Huygens' Prinzip gegeben.

41. Brechung von Wellen. — Wollen wir nun die Einzelwellen der Punkte 0 .... 4 und der dazugehörigen übrigen Punkte im zweiten Medium betrachten (Abb. 19), so ist vor allem die Kenntnis der Ausbreitungsgeschwindigkeit in diesem Medium erforderlich, um die Kugelradien für die zu betrachtende Zeit angeben zu können. Es ist dies die Zeit, in welcher der Strahl im ersten Medium den Weg A4 zurücklegt. Wir nehmen an, daß im zweiten Medium die Ausbreitungsgeschwindigkeit kleiner sei als im ersten, so daß in dieser Zeit nur ein Weg von der Größe 0B < A4 zurückgelegt wird, wonach A4 : 0B das Verhältnis der Ausbreitungsgeschwindigkeiten in den beiden Medien ist. Hiermit sind die Einzelwellen aller getroffenen Punkte der Grenzfläche bestimmt. Punkt 0 wird den vollen Kugelradius 0B haben, die anderen Punkte den ihnen zur Verfügung stehenden Zeiten, d. i. ihren Lagen entsprechende kleinere Radien, und Punkt 4 den Radius Null. Die gemeinsame Berührungsfläche ist das Stück Ebene B4, und dies ist somit die neue Wellenfront, und senkrecht zu ihr steht der Strahl im zweiten Medium, der gebrochene Strahl.

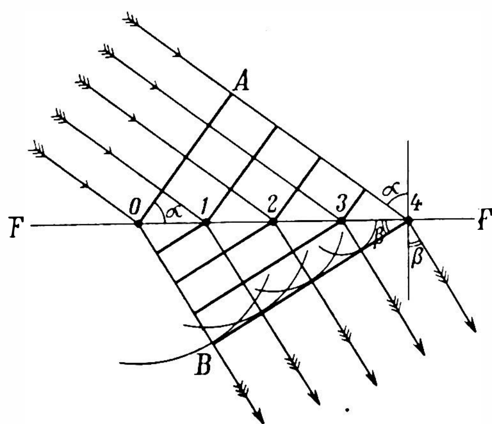


Abb. 19. Brechung einer Welle.

α und β sind dabei Einfalls- und Brechungswinkel, und man sieht, daß diese beiden Winkel auch in den rechtwinkligen Dreiecken 0 4 A und 0 4 B sich finden (weil die Schenkel senkrecht aufeinander stehen). Es ist aber aus diesen Dreiecken $\sin\alpha = A4/04$ und $\sin\beta = B0/04$, also $\sin\alpha/\sin\beta = A4/B0$. Dies ist aber

das Verhältnis der Ausbreitungsgeschwindigkeiten in den beiden Medien. Man sieht daraus erstens, daß das Verhältnis $\sin\alpha/\sin\beta$ für alle Größen von α dasselbe sein muß; denn das Geschwindigkeitsverhältnis ist eine Konstante des Mediumpaares. Man hat also das Brechungsgesetz aus Huygens' Prinzip. Zweitens sieht man weiter, daß der Brechungsexponent $\sin\alpha/\sin\beta = n$ eben die Bedeutung jenes Geschwindigkeitsverhältnisses hat. Im Wasser z. B. mit dem Brechungsexponenten $1{\cdot}33 = 4/3$ würde die Lichtgeschwindigkeit $(3/4)c$ sein, im Glase mit dem Brechungsexponenten $1{\cdot}5 = 3/2$ $(2/3)c$.

42. Die so durch den Brechungsexponenten gegebene Lichtgeschwindigkeit ist beim Wasser durch besondere, unmittelbare Messung bestätigt worden (Foucault 1850 mit dem Drehspiegel, 20), womit das Zutreffen von Huygens' Erklärung der Brechung mittels seines Prinzipes außer Zweifel gesetzt und die Bedeutung des Brechungsexponenten als Lichtgeschwindigkeitsverhältnis allgemein gesichert ist. Da aber Huygens' Prinzip besonders auf Wellenausbreitung sich bezieht, ist damit auch ein besonderes Beweisstück für die Wellennatur des Lichtes gegeben.

Dazu kommt auch noch, daß die Wellenlängen in verschiedenen Medien, die wie die Lichtgeschwindigkeiten sich verhalten (A Gl. 5), durch Interferenzversuche eingehend meßbar wurden (127, 134) und daß sie tatsächlich im Verhältnis der Brechungsexponenten der Medien stehend gefunden wurden.

Die Ursache der Verschiedenheiten der Lichtgeschwindigkeit in den verschiedenen Medien untersuchen wir später (88).

43. Man sieht nun auch, daß der Brechungsexponent zweier beliebiger Medien gegeneinander (35) stets als Quotient der beiden einzelnen Brechungsexponenten (gegen leeren Raum) berechnet werden kann, weil dieser Quotient nach Vorigem richtig das Verhältnis der beiden Lichtgeschwindigkeiten angibt. Ein „optisch dichteres" Medium, d. i. eines mit größerem Brechungsexponenten (vgl. 35), ist, wie man sieht, ein Medium mit kleinerer Lichtgeschwindigkeit; ein „optisch dünneres" hat größere Lichtgeschwindigkeit.

f) Die Farben des Lichtes.

44. Lichtbrechung in Prismen. — Wesentlich am „Prisma" der Optik — auch „Kantglas" zu nennen — sind nur die beiden ebenen Grenzflächen, welche unter einem gewissen Winkel einen durchsichtigen Stoff einschließen; die dritte Prismenseite hat nicht mitzuwirken. Fällt der Lichtstrahl unter dem Einfallswinkel α (Abb. 20) auf die eine Fläche, so bestimmt — wie leicht zu sehen — der Brechungsexponent n des Prismenstoffes zusammen mit dem Prismenwinkel A bei zweimaliger Anwendung des Brechungsgesetzes die Gesamtablenkung B, welche der Strahl

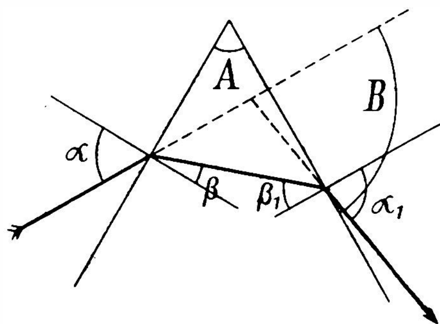


Abb. 20. Brechung im Prisma.

durch das Prisma erfährt. Diese Ablenkung ist immer nach der stumpfen Seite des Prismas hin gerichtet, und es gehört zu jedem Einfallswinkel α im allgemeinen ein anderer Ablenkungswinkel B.

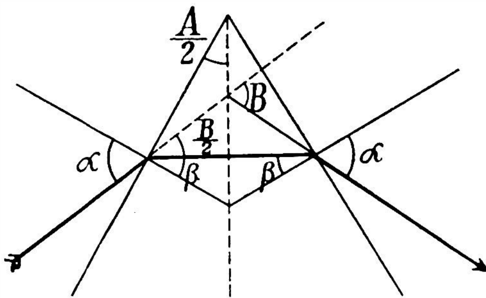


Abb. 20a. Minimum der Ablenkung.

Die Ausführung der zugehörigen Rechnung nach dem Brechungsgesetz zeigt, daß dieser Ablenkungswinkel B beim symmetrischen Strahlengang, wie ihn Abb. 20a zeigt, kleiner ist als in allen anderen möglichen Fällen. Dieses „Minimum der Ablenkung" ist dann nur mehr vom Prismenwinkel A und vom Brechungsexponenten n abhängig. Je größer A und n, desto größer ist die Ablenkung.

Der Prismenwinkel A = 0° — die planparallele Platte — gibt gar keine Ablenkung, sondern nur Parallelverschiebung des Strahls, wie es Abb. 21 zeigt.

Ist der Prismenwinkel A und die Minimumsablenkung B gemessen, so kann daraus der Brechungsexponent n gefunden werden. Es ist (mittels des Brechungsgesetzes und wenig Geometrie aus Abb. 20a leicht zu errechnen)

$$n = \sin\frac{A+B}{2} \Big/ \sin\frac{A}{2}.$$

Dies ist der gewöhnlichste Weg zur genauen Ermittelung von Brechungsexponenten. Man muß dazu den betreffenden Stoff in Prismenform anschleifen oder, wenn er flüssig oder gasförmig ist, in ein Hohlprisma füllen. Die Wände des Prismas sind einflußlos, wenn sie planparallel sind.

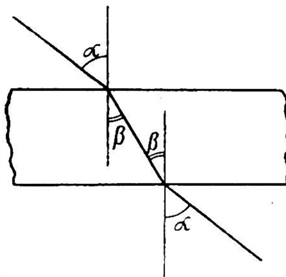


Abb. 21. Brechung in planparalleler Platte.

Zu genauer Messung der Winkel A und B wendet man ein Fernrohr mit Fadenkreuz im Okular an, das an einem Teilkreis drehbar ist, in dessen Mittelpunkt das Prisma steht (vgl. 65). Das benutzte Licht muß dann von einem engen Spalt kommen, der weit entfernt aufgestellt ist oder durch einen „Kollimator" wirkt (vgl. Note zu 62, und 70).

Den Brechungsexponenten der Luft kann man mittels eines ausgepumpten Hohlprismas messen, das dann nach der spitzen Seite ablenkt. Dieser sehr kleine Brechungsexponent (vgl. Tab. 36) ist abhängig von der Dichte der Luft (n—1 proportional der Dichte).

Die Lichtbrechung in der Luft ist wichtig, weil alle Gestirne durch die Luft der Atmosphäre beobachtet werden; sie erscheinen dadurch gegen den Zenith hin gehoben und zwar um so mehr, je näher sie dem Horizont stehen. Da die Dichte der Luft von oben nach unten in der Atmosphäre zunimmt, wird der vom Gestirn kommende Strahl an jeder Luftschicht neu gebrochen; sein Lauf wird dadurch krumm mit der hohlen Seite nach unten. Am Horizont beträgt die Gesamtablenkung („atmosphärische Refraktion") etwa ½ Grad (Vollmondsbreite)[1]; im Zenith ist sie Null.

45. Farbiges Licht. — In allem Bisherigen kam nur Licht überhaupt in Betracht; jetzt müssen wir auf die Unterschiede der Lichter[2]) eingehen, die

[1]) Die in gleichem Sinne zu erwartende Strahlenkrümmung infolge der Schwere der Energiemassen des Lichts (15) beträgt nur Zehntausendstel einer Bogensekunde.

[2]) Es ist hier daran zu erinnern, daß wir als „Licht" immer den Raumvorgang untersuchen: das Licht selbst (vgl. 1). Was oben folgt ist demnach die Untersuchung der verschieden-

das Auge als Farbenunterschiede wahrzunehmen befähigt ist. Wodurch unterscheidet sich z. B. rotes Licht von weißem?

Man weiß, daß „*farbige*" *Körper* — z. B. rotes Fahnentuch, rotes Glas — aus weißem Licht rotes Licht machen können. Das Licht ist weiß bis dorthin, wo es den Körper trifft, und es geht rot von ihm weiter, sei es reflektiert oder durchgelassen. Man kann — in sonst dunklem Zimmer — durch Einschieben eines Schirmes (vgl. 11) an beliebiger Stelle des Strahlenweges sich von der Farbe des Lichtes, ob weiß oder rot, überzeugen. Wie macht der „rote Körper" das Licht rot?

Man weiß auch, daß es *Quellen ursprünglich schon farbigen Lichtes* gibt; die Feuerwerkerei benutzt das seit langem.

Weiter weiß man, daß aus weißem Licht auch ohne Mitwirkung farbiger Körper farbiges Licht entstehen kann, nämlich *bei der Brechung*. Brechung weißen Lichtes findet sogar niemals statt ohne daß Farbe auftritt; das gebrochene Strahlenbündel weißen Lichtes zeigt sich farbig umrändert (vgl. 50). Wir ließen das im Bisherigen unerwähnt; hier ist nun der Ort, auf diese Nebenerscheinung der Brechung einzugehen und damit die Fragen des farbigen Lichtes überhaupt zu behandeln.

Gerade die bei der Brechung auftretenden Farben waren es, die zuerst über alle diese Fragen Aufklärung gaben (Newton 1675). Die Brechung von Licht in farblosen Körpern ist etwas viel Einfacheres als das in der Tat auch viel später erst klar gewordene Zusammenwirken von Materie und Licht in den farbigen Körpern oder farbigen Lichtquellen.

46. *Spektrum.* — Besonders deutlich liefert die Brechung farbiges Licht aus weißem *bei der Brechung im Prisma* (44), weil die beiden Brechungen an seinen zwei Flächen hierbei, in gleichem Sinne wirkend, einander unterstützen. Fällt ein schmaler Strahl weißen Lichtes auf ein Glasprisma oder ein mit Wasser oder besser mit dem besonders stark lichtbrechenden Schwefelkohlenstoff gefülltes Hohlprisma, so tritt aus dem Prisma ein Bündel divergierender, verschiedenfarbiger Lichter aus, wie es Abb. 22 andeutet.

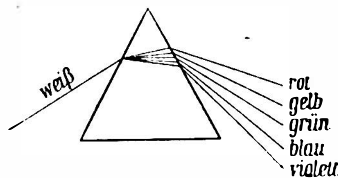


Abb. 22. Farbenzerstreuung.

---

farbigen *Lichter*. Wenn wir diese Lichter manchmal kurz mit ihren Farbennamen („Rot", „Blau" usw.) bezeichnen, so meinen wir demnach doch nicht das, was oft, ja wohl meist — da Naturkenntnis so selten ist — bei den Farbennamen gedacht wird. Wir meinen nämlich nicht *Farbeneindrücke* oder Empfindungen — mögen diese bei Künstlern oder Dichtern noch so sehr im Vordergrund stehen — oder gar *Farbstoffe* (54, 56). Diese ganz verschiedenen Dinge mit farbigem *Licht* (d. i. mit Ätherwellen) zu verwechseln, wozu allerdings die für alle drei Dinge — Licht, Empfindung und Stoff — gemeinsam in Gebrauch befindlichen Farbennamen verleiten können, muß Allen fern sein, die uns bisher im Denken mit fest definierten Begriffen gefolgt sind. Das von uns definierte Licht — die Ätherwelle — endet an der Netzhaut des beobachtenden Auges (64). Daß es dort Nervenreizung hervorbringt — wohl auf dem Wege chemischer Wirkung bei seiner Absorption (101) — und daß das dann Farbenempfindung für den Beobachter ergibt, dies untersuchen wir hier nicht. Es ist auch nicht so viel Gesichertes darüber bekannt, und die Farbenempfindungen, Farbeneindrücke — die „Farben"-Gedanken von Künstlern, Dichtern — bedeuten wohl auch gar nichts Allgemeingültiges, von menschlichen Besonderheiten Unabhängiges. Auch auf die Eigentümlichkeiten des Auges als Farbenwahrnehmungsorgan gehen wir nur nebenher ein (53). Diese Eigentümlichkeiten müssen allerdings — wie auch die der anderen Sinnesorgane (vgl. A 1, W 2) — dem Naturforscher eingehend bekannt sein, um ihn vor Irrtum in der Deutung der Sinneseindrücke zu schützen; aber dies versteht sich für den Befähigten von selbst.

Man kann sich durch Einschieben von Papierstücken davon überzeugen, daß die verschiedenfarbigen Lichter schon bei der ersten Brechung auseinandergehen und daß dies bei der zweiten Brechung nur noch verstärkt wird. Die verschiedenfarbigen Lichter bilden von rot über gelb, grün, blau und violett eine ununterbrochene Farbenfolge mit vielen zwischenliegenden Farbentönen. Man nennt dieses, durch das Prisma aus dem weißen Lichtfleck, der ohne Prisma auf dem Schirm erschienen wäre, gewordene Farbenband das „Spektrum".

47. Lichtstrahlen, die von verschiedener Farbe sind, sind auch von verschiedener Brechbarkeit. — Die einfachste Auffassung von der Entstehung des Spektrums des weißen Lichtes ist diese: daß die verschiedenfarbigen Lichter im weißen Licht schon vorhanden waren und daß sie bei der Brechung nur getrennt werden, weil sie verschieden stark brechbar sind. Daß diese Auffassung vollkommen die Wirklichkeit trifft, dies ist von Newton und weiter durch sämtliche Erfahrungen am Licht aufs Eingehendste nachgewiesen, wovon das Folgende einige entscheidende Proben gibt.

Vor allem zeigt sich, daß es in der Tat nur die Brechung ist, welche die Farben des Spektrums aus dem weißen Licht hervorbringt: Senkrechter Einfall, der ohne Brechung ist, bringt auch keine Farben hervor; je schiefer aber der Einfall, je stärker also die Brechung — entsprechend dem Brechungsgesetz —, desto mehr werden die Farben voneinander getrennt, weil mit der Vermehrung der Brechung auch die Brechungsunterschiede der einzelnen farbigen Lichter vermehrt werden.

Jedem der verschiedenfarbigen Strahlen des Spektrums gehört ein besonderer Brechungsexponent zu, den man mit dem Prisma — aus Ablenkungswinkel und Prismenwinkel — ermitteln kann (44). Rot hat den kleinsten, Violett den größten Brechungsexponenten; die zwischenliegenden Farben des Spektrums haben zwischenliegende Brechungsexponenten, wie es Tab. 36 (35) für verschiedene brechende Stoffe zeigt.

Diese Brechungsexponenten gehören den Lichtern der einzelnen Farben beim gegebenen Stoff immer zu, unter welchem Winkel auch die Brechung stattfindet und welchen Ursprungs auch das Licht der betreffenden Farbe sei. Das Licht kann von farbigen Körpern oder von farbigen Quellen kommen, es kann auch aus dem weißen Licht durchs Prisma im Spektrum abgesondert sein; stets bewährt es seine besondere Brechbarkeit.

Zur Prüfung der verschiedenen Brechbarkeit der einzelnen farbigen Lichter des Spektrums entwirft man dasselbe auf einem Schirm, der eine Öffnung hat, die das Strahlenbündel irgendeiner der Spektralfarben für sich allein durchläßt. Das so ausgesonderte farbige Licht läßt man auf ein zweites Prisma fallen, das es einer neuen Brechung unterwirft. Es zeigt sich dabei, daß z. B. das Violett auch im zweiten Prisma am meisten, das Rot am wenigsten abgelenkt wird; es behält das Licht jeder Spektralstelle mit seiner Farbe auch seinen bestimmten, zum betreffenden Prismenstoff gehörigen Brechungsexponenten unverändert bei.

Man sieht, daß beim Vorhandensein der farbigen Lichter des Spektrums im ursprünglichen, weißen Licht in der Tat notwendigerweise die Zerlegung im Prisma stattfinden muß, weil die verschiedenfarbigen Lichter ihre verschiedene Brechbarkeit auch schon im ersten Prisma ebenso betätigen, wie in einem zweiten oder dritten Prisma. Daß dem so ist, zeigt schon die fortschreitende Trennung

der Farbe bei der Brechung an den beiden Flächen des ersten Prismas: es macht keinen Unterschied für die Brechung, ob die verschiedenfarbigen Lichter gemischt oder schon mehr oder weniger getrennt vorhanden sind.

48. Weißes Licht ein Gemisch der farbigen Lichter. — Erscheint auch die Auffassung wohl anfangs fremd, daß das naturgegebene weiße Licht der Sonne und auch der künstlichen Lichtquellen — die alle das Spektrum von Rot bis Violett geben — nichts Einfaches, sondern ein Gemisch der farbigen Lichter sei, so ist dem doch so; alle nur erdenklichen Proben zeigten es. Eine besondere Probe besteht in der Rückzusammensetzung weißen Lichtes aus den farbigen Lichtern des Spektrums.

Fängt man die aus dem Prisma tretenden farbigen Strahlen in geeignetem Abstande durch einen Hohlspiegel auf (30), so daß dieser ein reelles Bild des Prismas entwirft, so kommen die vom Prisma divergierenden farbigen Strahlen am Orte dieses Bildes wieder zusammen. Das Bild erscheint dann — auf einem Schirm aufgefangen — weiß. Unterwegs, vor dieser Wiedervereinigung aufgefangen, sieht man die verschiedenfarbigen Strahlen noch ganz bez. teilweise getrennt mit ihren Farben. Diese Rückzusammensetzung des weißen Lichtes mit dem Hohlspiegel findet ganz ohne neue Brechung des Lichtes statt; man kann aber an Stelle des Hohlspiegels auch eine Sammellinse (58) mit gleichem Erfolg benutzen.

Die Erkenntnis des weißen Lichtes als etwas Zusammengesetztem, im Gegensatz stehend zur ursprünglichen Erwartung, daß es als naturgegeben einfach und erst künstlich zu „färben" sei, ist durch die Untersuchung der Vorgänge in den Quellen weißen Lichtes, den heißen festen und flüssigen Körpern oder sehr dichten Gasen, schließlich fast selbstverständlich geworden: Diese sehr verwickelten Vorgänge können nichts Einfaches liefern (80).

49. Einfarbiges (monochromatisches) Licht. — Einfach, nicht weiter zerlegbar, sind — im Gegensatz zum weißen Licht und anderen Farbengemischen (50, 53 u. f.) — die im Spektrum erscheinenden farbigen Lichter von Rot bis Violett. Keines dieser Lichter sieht genau gleich dem anderen aus; sie bieten dem Auge in der Länge des Spektrums einen ununterbrochenen Übergang von Färbungen — „Farbentönungen" — ineinander. Jede dieser Färbungen gehört zu einer bestimmten Spektralstelle, entsprechend der Brechbarkeit des betreffenden Lichtes (47).

Einige dieser Lichter, wie z. B. das Gelbrot — Apfelsinengelb —, zwischen Rot und Gelb im Spektrum gelegen, oder das Blaugrün, sehen aus als sollten sie Gemische der beiden, ihnen benachbarten Spektralfarben sein. Die Prüfung darauf ist einfach; sie erfolgt mittels eines zweiten Prismas in derselben Weise, wie die Brechbarkeit der verschiedenfarbigen Lichter geprüft wurde (47). Man sieht dabei, daß z. B. das nochmals durch ein Prisma gegangene Gelbrot nicht in Gelb und Rot zerfällt, sondern unverändert gelbrot bleibt und ebenso das Blaugrün unverändert blaugrün.

Aber nicht nur mittels wiederholter Brechung erweisen sich die farbigen Lichter des Spektrums als unzerlegbar; sondern auch in keiner anderen Weise gelingt eine Zerlegung derselben. Sie sind die letzten, einfachen Bestandteile aller sichtbaren Lichter beliebiger Färbung, aller Farbenmischungen, mit Einschluß des weißen Lichtes.

Man nennt diese Grundbestandteile aller Lichter, zur Unterscheidung von ähnlich oder gleich aussehenden farbigen Lichtern (vgl. 53), einfarbige, monochromatische oder auch — ihrer Erhältlichkeit nach — spektrale Lichter, auch spektrale Farben.

50. Reines Spektrum. — Um die eben gedachten Zerlegungsversuche und auch sonstige Spektralbeobachtungen zur Befriedigung ausführen zu können, ist ein reines Spektrum erforderlich, d. i. eines, an dessen jede Stelle tatsächlich nur einerlei Licht fällt. Es ist leicht einzusehen, daß die Erfüllung dieser Bedingung Vorsichten erfordert, ja daß ein vollkommen reines Spektrum überhaupt nur in — allerdings beliebig zu steigernder — Annäherung erreichbar ist.

Abb. 22 zeigt einen Strahl weißen Lichtes und einige der farbigen Strahlen, in welche er je nach deren Brechungsexponenten zerfällt. Man würde hier an einem Schirm ein reines Spektrum auffangen, wenn ein unendlich schmaler Strahl — wie in der Abbildung angenommen — verfügbar wäre. In Wirklichkeit gibt es aber nur mehr oder weniger breite Strahlenbündel (9). Zeichnet man mehrere, dem weißen Strahl der Abb. 22 parallele Strahlen eines solchen Bündels mit ihren gebrochenen verschiedenfarbigen Strahlen in die Abbildung ein, so sieht man, daß auf dem auffangenden Schirm verschiedene Farben der verschiedenen Einzelstrahlen zur Deckung kommen, ausgenommen nur an den Rändern des Spektrums, die rein Rot und rein Violett bleiben. Ist das einfallende Bündel weißen Lichtes einigermaßen breit, so decken sich in der Mitte des Spektrums so viele Farben, daß die Mitte ganz weiß erscheint und nur die Ränder des gebrochenen breiten Strahlenbündels farbig bleiben. Es wäre das ein sehr unreines Spektrum.

Am einfachsten nähert man sich dem reinen Spektrum, wenn man ein schmales Bündel Sonnenstrahlen benutzt, das durch ein enges Loch ins sonst verdunkelte Zimmer fällt. Ohne Prisma ergäbe sich auf einem Schirm ein Lochkammerbild (11, 12) der Sonne; mit Einschaltung des Prismas erhält man die Reihe unendlich vieler, unendlich dicht nebeneinander liegender Sonnenbilder der verschiedenen, im weißen Licht enthaltenen Farben. Aber es überdecken sich auch hier wieder benachbarte Bilder, weil die Sonnenscheibe und daher auch ihr Lochkammerbild nicht ohne Breite ist.

Ein recht reines Spektrum sieht man in sehr einfacher Weise, wenn man ein Prisma dicht vors Auge hält und durch dasselbe nach einer hellen Linie, z. B. einem sehr schmalen, sonnenbeleuchteten Papierstreifen auf dunklem Hintergrund sieht, der der Prismenkante parallel ist. Ist der Papierstreifen weiß, so sieht man das vollständige Spektrum mit all seinen Farben. Man kann dies „subjektive" Beobachtung des Spektrums nennen im Gegensatz zur „objektiven" auf einem Schirm. Die Erklärung der Erscheinung ist einfach: Die vom weißen Gegenstand gemischt ausgehenden verschiedenfarbigen Strahlen werden, jeder nach seiner Brechbarkeit, im Prisma abgelenkt, so daß jeder in anderer Richtung ins Auge gelangt und daher auch in anderer Richtung gesehen wird (29).

Man kann so auch leicht die Spektren der Lichter beliebiger Farbstoffe oder auch farbiger Lichtquellen (45) sehen, wenn man diese in linearer Anordnung oder durch eine Spalte leuchtend durch das Prisma betrachtet. Man findet, wie schon bemerkt (49), in den Spektren aller beliebigen Lichter nur dieselbe Farbenverteilung, wie im weißen Licht, jedoch oft mit Lücken, und je nach dem Fehlen dieser oder jener Farbe im Gemisch richtet sich der Eindruck des gemischten Lichtes aufs Auge (53). Monochromatische Lichter trifft man selten und nur mit Annäherung; eine sehr nahe monochromatische Lichtquelle ist eine mit Natrium-Salz versehene Leuchtgasflamme (77).

In größter Vollkommenheit und Lichtstärke erhält man reine Spektren nur mit Zuhilfenahme von Linsen (oder Hohlspiegeln, 70).

51. Der Regenbogen. — Das Licht der Sonne wird an den kugelförmigen Regentropfen reflektiert. Die außen reflektierten Strahlen gehen allseitig gleichförmig verteilt auseinander, wovon man nach dem Reflexionsgesetz leicht sich überzeugen kann. Dieses allseitig zerstreute Licht läßt die Regenwand der fallenden Tropfen nur gleichmäßig grau erscheinen. Das in die Tropfen eindringende Sonnenlicht wird an deren hinterer Oberfläche zum Teil reflektiert und zwar in besonderer Richtungsverteilung: Ein Teil dieses reflektierten Lichtes tritt als sehr nahezu paralleles Bündel wieder aus dem Tropfen aus, wovon man mit

Anwendung des Brechungsgesetzes und des Reflexionsgesetzes in Zeichnung (oder Rechnung) sich überzeugen kann. Dieses parallele Bündel macht starken Eindruck auf das Auge, weil bei parallelem Licht die Intensitätsabnahme nach dem verkehrten Entfernungsquadrat fehlt. Ein Auge, welches dieses Bündel auffängt, sieht den Tropfen, aus welchem es kommt, hell glänzen. Das parallele Bündel hat aber wegen der Unterschiede in den Brechungsexponenten des Wassers für jede Farbe eine andere Richtung. Daher sind es verschiedene, übrigens benachbarte Richtungen, in welchen ein Beobachter die Tropfen der Regenwand rot, gelb, grün, blau glänzen sieht, wenn er gegen sie blickt; er sieht eine spektrale Farbenanordnung. Die Sonne muß dabei hinter dem Beobachter stehen, da es reflektiertes Licht ist, das wirkt. Jede Farbe tritt dabei in kreisförmiger Anordnung auf, mit dem Schatten des Kopfes des Beobachters im Mittelpunkt, weil für jede Farbe ein bestimmter, durch den Brechungsexponenten bedingter Winkel gilt, den das wirksame, parallele Bündel mit dem einfallenden Sonnenlicht bildet.

Der Nebenregenbogen kommt in gleicher Weise durch zweimal in den Tropfen reflektiertes Licht zustande. Er umgibt außen den Hauptregenbogen; seine Farbenfolge ist der des Hauptregenbogens entgegengesetzt; das Rot des Hauptregenbogens ist oben, das des Nebenregenbogens unten.

Daß die Winkel und die Farbenfolgen aus den Brechungsexponenten des Wassers richtig berechenbar sind, ist der Nachweis für die Richtigkeit der Erklärung (Descartes, Newton).

Es wirken übrigens bei den Regenbögen immer auch Beugungs- und Interferenzerscheinungen mit (vgl. 159), die die Farbenfolge und die Breite des Regenbogens stark beeinflussen können und zwar um so mehr, je kleiner die Regentropfen sind.

52. N a t u r d e r m o n o c h r o m a t i s c h e n L i c h t e r u n d U r s a c h e i h r e r v e r s c h i e d e n e n B r e c h b a r k e i t. — Da Licht — wie wir vorausschickten — ein Wellenzug im Äther ist, müssen auch die monochromatischen Lichter Ätherwellen sein, jedoch mit Unterschieden, die für das Auge die Unterschiede im Farbeneindruck geben. Wir werden zugleich mit dem Nachweis der Wellennatur die Auskunft erhalten, daß die Farbenunterschiede U n t e r s c h i e d e d e r W e l l e n l ä n g e n sind (127 u. f., 152). Rot hat die längsten Wellen, 0·0008 mm, die brechbareren Lichter haben der Reihe nach kürzere Wellen und das Violett hat die kürzesten sichtbaren Wellen, 0·0004 mm.

Die Farbenunterschiede der Lichter sind demnach analog den Tonhöhenunterschieden beim Schall (A 45). Während man aber viele Oktaven hört, ist das Auge nur für ein geringes Wellenlängenbereich, im Verhältnis 1 : 2, d. i. nur für eine einzige „Oktave" der Ätherwellen eingerichtet, wie es die Zahlen zeigen.

Daß — wie im weißen Lichte — verschiedene Wellenlängen in großer Zahl gemischt — übereinander gelagert — im selben Wellenzug enthalten sein können, dies ist eine Eigenschaft aller Wellenarten; sie beruht beim L cht auf der ungestörten Übereinanderlagerung elektrischer und magnetischer Kräfte (E 282). Beim Schall findet sich solche Übereinanderlagerung in den Zusammenklängen und den Geräuschen (A 54, 67).

Aus der Wellenlänge λ berechnet man unmittelbar die Schwingungsdauer T, sowie die S c h w i n g u n g s z a h l $n = 1/T$. Es ist, wie für alle Wellen (A, Gl. 5), $n = c/\lambda$, was mit den angegebenen Wellenlängen in abgerundeter Zahl

$400 \cdot 10^{12}$ Schwingungen in der Sekunde für Rot und $800 \cdot 10^{12}$ für Violett ergibt. Als Fortpflanzungsgeschwindigkeit war hier die Lichtgeschwindigkeit c im Äther zu setzen, da Wellenlängen im Äther angegeben waren.

Die Frage, warum die verschieden langen Wellen verschieden brechbar sind, beantwortet sich nach dem über die Brechung überhaupt bereits Eingesehenen (41) dahin, daß die verschieden langen Wellen in den Körpern verschieden schnell laufen. Weil und insofern die kürzesten Wellen in der Materie mehr verzögert werden als die längeren, werden sie auch mehr gebrochen als diese; die Brechungsexponenten der verschiedenen Farben (Tab. 36) geben das Maß für die Lichtgeschwindigkeiten bei verschiedenen Farben in den betreffenden Körpern.

Im freien Äther laufen alle Wellenlängen mit der gleichen Geschwindigkeit c. Dies wird dadurch sicher, daß bei Sternbedeckungen durch den Mond oder bei den Verfinsterungen der Jupitermonde, auch bei Bedeckungen noch fernerer Himmelskörper keine Farbenerscheinungen auftreten, was der Fall sein müßte, wenn einer der verschiedenfarbigen Bestandteile des weißen Lichtes gegen die anderen zurückbliebe und daher zuletzt allein ins Auge käme.

Der Grund der Lichtgeschwindigkeitsunterschiede in den materiellen Medien liegt in elektrischem Mitschwingen der Atome dieser Medien. Die Atome haben eigene Schwingungszahlen; daher die Verschiedenheit der Verlangsamung der Wellenzüge je nach deren verschiedenen Schwingungszahlen. Wir behandeln dies später bei gemeinsamer Betrachtung auch der anderen Folgen der Mitwirkung der Atome (87). Es sei hier nur bemerkt, daß nicht immer die kürzesten Wellen (größten Schwingungszahlen) am meisten verlangsamt, also am stärksten gebrochen werden müssen. Nur in den gewöhnlichen, gut brauchbaren Prismenstoffen ist dies der Fall; in anderen Stoffen kann die Reihenfolge der Brechbarkeiten auch abgeändert — „anomal" — sein (s. 87).

53. Farbeneigentümlichkeiten des Auges. — Eine besondere, nicht das Licht, sondern das Auge betreffende Frage ist es, welchen Eindruck die verschiedenen vorkommenden Gemische verschiedenfarbiger Lichter — d. i., nach dem Erkannten, verschieden langer Ätherwellen — auf das Auge machen. Auskunft hierüber kann nur durch Beobachtung bekannter Lichtgemische gewonnen werden und zwar in reinen Versuchen, nämlich mit monochromatischen Lichtern.

Um solche Gemische herzustellen, verfährt man wie bei der Rückzusammensetzung des weißen Lichtes (48). Man entwirft auf einem Schirm ein reines Spektrum (50, 70), läßt durch Öffnungen des Schirmes diejenigen Lichter durch, die man mischen will und vereinigt sie durch einen Hohlspiegel oder eine Sammellinse auf einen zweiten Schirm, um an diesem den Farbeneindruck des Gemisches zu beobachten, allenfalls im Vergleich mit anderen Lichtern, die man daneben auf den Schirm fallen läßt. Ein anderes Verfahren zu reinen Versuchen mit Farbgemischen gibt es nicht[1]).

Folgendes sind Hauptergebnisse solcher Beobachtungen:

1. Ein spektrales Rot und ein spektrales Gelb geben in passender Auswahl und Menge zusammen genau den Eindruck eines spektral zwischenliegenden Rotgelb oder Gelbrot (Apfelsinengelb), obgleich die Mischung zweierlei Wellenlängen, das spektrale Apfelsinengelb aber nur eine Wellenlänge enthält.

Ebenso ist es mit spektralem Grün und Blau und dem zwischenliegendem Blaugrün.

2. Mischt man alle spektralen Lichter mit Ausnahme des roten Spektralendes, so erhält man für das Auge den Eindruck von (weißlichem) Grün. Läßt man das Rot auch noch dazu, so hat man weiß, weil nun das ganze Spektrum gemischt ist. Man kann dieses Ergebnis dahin

[1]) Farbstoffe zu mischen ist ganz verfehlt (56).

festhalten, daß Rot und Grün zusammen für das Auge Weiß geben, und man nennt zwei Farben, die zusammen Weiß geben, wie Rot und Grün, komplementär. Auch von Blau und Gelb läßt sich ebenso nachweisen, daß sie komplementär sind.

Das Besondere ist aber außerdem, daß man auch aus monochromatischem Rot und einem gewissen monochromatischen Grün von geeigneter Wellenlänge und Intensität ebenfalls tadelloses Weiß für das Auge erhält. Man kann also dem Auge schon mit zwei (passend gewählten) Wellenlängen den Eindruck verschaffen, den ihm das Gemisch sämtlicher Wellenlängen macht. Ebenso wie mit Rot und Grün ist es mit Gelb und Blau, die zusammen sowohl in gemischter als aber auch in monochromatischer Beschaffenheit den Eindruck Weiß machen.

3. Man sieht aus dem so Festgestellten schon, wie wenig geeignet das bloße Auge zur Beurteilung farbiger Lichter ist; es ist nicht einmal dazu befähigt, monochromatisches von stark gemischtem Licht mit Sicherheit zu unterscheiden. Ein besonderes Beispiel dafür ist das meiste Gelb von Farbstoffen, das fast immer das ganze Spektrum, nur ohne Blau und Violett im Gemisch enthält und doch fürs Auge kaum vom monochromatischen Gelb der Natriumflamme unterscheidbar ist. Das Auge muß daher zur Analyse und überhaupt richtigen Beurteilung farbiger Lichter stets mit dem Prisma bewaffnet werden, das ihm die tatsächlich vorhandenen Bestandteile zeigt (vgl. 50).

4. Die meisten Gemische farbiger Lichter machen dem Auge keinen wesentlich neuen Eindruck gegenüber reinen Spektralfarben oder deren Gemischen mit Weiß bis zu reinem Weiß; alle bisher vermerkten Beispiele zeigen dies. Nur einen besonderen Fall gibt es, der anders ist: Mischt man die beiden Spektral-Enden, d. i. Rot-Rotgelb mit Blau-Violett in verschiedenem Umfang und Mengenverhältnis, so erhält man neue Farbeneindrücke, nämlich Purpur und dessen Abarten (Rosa, Lila usw.), die keiner Stelle eines reinen Spektrums zugehören. Auch dies ist eine besondere Eigentümlichkeit des Auges.

5. Zusammenfassend kann gesagt werden, daß man dem Auge mit drei Wellenlängen alle Farbeneindrücke liefern kann, die ihm überhaupt vorkommen, einschließlich Purpur und Weiß, wenn man die 3 Wellenlängen jeweils in geeignetem Intensitätsverhältnis mischt. Es sind das: ein spektrales Rot, ein spektrales Gelbgrün und ein spektrales Violett. Man überzeugt sich durch Mischungsversuche, daß dies zutrifft, und auch die unter 1—4 vorgebrachten Fälle zeigen es schon.

6. Alle diese Erfahrungen haben zum Schlusse geführt, daß die Netzhaut des Auges (64) dreierlei Nervenenden dicht verteilt enthält, die je für eine der 3 genannten Farben und deren spektrale Umgebung empfindlich sind. Bei jedem Farbeneindruck kommt es danach nur darauf an, in welchem Stärkeverhältnis die dreierlei Nervenenden gereizt werden. Wellenlängen oder Wellenlängengemische, die das gleiche Reizungsverhältnis geben, müssen gleich aussehen, wenn das Auge kein anderes Beurteilungsmittel hat als dieses Reizungsverhältnis, und dies ist auch das wirkliche Verhalten des Auges. Gleichmäßige Reizung aller 3 Nervenenden gibt den Eindruck von Weiß; ob dabei alle Wellenlängen mitwirken oder ob beliebig viele Wellenlängen im Spektrum fehlen ist gleichgültig (vgl. 128).

54. Wirkung gefärbter Körper. — Es ist noch die Frage zu untersuchen, wie aus dem weißen Tageslicht die farbigen Lichter entstehen, die all die verschiedenen gefärbten Körper, auch Farbgläser, Farbstoffe, dem Auge bieten.

Die Antwort ist im allgemeinen diese: Es findet keine Umfärbung des Lichtes statt, keine Abänderung von Wellenlängen, sondern nur eine Auswahl unter den im auftreffenden Licht vorhandenen Wellenlängen. Jeder farbige Körper verschluckt, absorbiert bestimmte Wellenlängen des in ihn eindringenden Lichtes und andere nicht. Man nennt dies auswählende („selektive") Absorption. So absorbiert beispielsweise gewöhnliches rotes Glas alle Lichter mit Ausnahme des roten, das allein durchgelassen wird, und daher findet man weißes Licht nach Durchsetzung dieses Glases rot geworden. Fehlt Rot im auffallenden Licht, so geht überhaupt nichts durch das Glas, es erscheint dann undurchsichtig. Daß die in diffus reflektiertem Licht erscheinenden Körperfarben ganz des gleichen Ursprungs sind, ist daraus klar, daß das auftreffende Licht in die Körper eindringt und wieder aus ihnen herauskommt (33, 36); sie wirken also auch durch

Absorption von Licht in ihrem Inneren. So ist es auch bei Farbschichten, die auf weißes Papier gemalt oder gedruckt sind; das Papier sendet das Licht zurück, das somit die Farbschicht zweimal durchsetzt hat ehe es ins Auge kommt.

Man kann überschläglich sagen: Jeder Farbstoff absorbiert das zu seiner Farbe komplementäre Licht (53); bei manchen Körpern ist die Absorption allerdings ziemlich kompliziert über das Spektrum verteilt (vgl. 84). Ein Körper, der alle Wellenlängen absorbiert, ist „schwarz", einer, der alle gleichmäßig durchläßt oder reflektiert, ist „farblos" oder „weiß".

Am besten überzeugt man sich von der die Farben — Wellenlängen — nur auswählenden, nicht abändernden Wirkung der gewöhnlichen Farbstoffe, wenn man sie monochromatisch beleuchtet. Man halte den farbigen Körper in den Strahlengang eines Spektrums: er wird dann keine Farbe zeigen als nur die, von der er beleuchtet ist mehr oder weniger hell. Rotes Tuch z. B. erscheint im Rot des Spektrums vollkommen hell rot, im Grün dagegen vollkommen schwarz; es kann nur rotes Licht wiedergeben, grünes oder überhaupt andersfarbiges Licht nicht rot machen. Ebenso auffallend wird dasselbe klar, wenn man eine monochromatische Lichtquelle benutzt, wie z. B. eine mit Natriumsalz gelbleuchtend gemachte Flamme; in ihrem Lichte erscheint kein Gegenstand in anderer Farbe als nur gelb, in mehr oder minder großer Helligkeit abgestuft bis zu schwarz.

Daß es dennoch gewisse Körper gibt, die das Licht umzufärben, die Wellenlängen abzuändern vermögen, sei hier gleich bemerkt; es sind die *fluoreszenzfähigen und phosphoreszenzfähigen Körper*, deren Wirkungsweise wir später betrachten (102 u. f.).

55. Als ein besonderer Fall des Auftretens farbigen Lichtes aus weißem ist noch die „*auswählende (selektive) Reflexion*" zu erwähnen, die bei Metallen und anderen sehr stark absorbierenden Körpern (intensiven Farbstoffen) vorkommt. Sie besteht darin, daß gewisse Wellenlängen mehr reflektiert werden als andere. So reflektiert Gold vorzugsweise gelbes Licht, Kupfer rotes, und der rote Farbstoff Fuchsin glänzt im reflektierten Licht grün. In diesen Fällen entsteht Farbe ebenfalls durch Auswahl unter vorhandenen Wellenlängen, jedoch bei der bloßen Reflexion, *ohne daß das Licht den Körper durchsetzt*.

Es werden stets diejenigen Wellenlängen vorzugsweise — selektiv — reflektiert, die der betreffende Körper stark absorbiert, weil sowohl starke Absorption als starke Reflexion auf starkem, elektrischen Mitschwingen der Atome des Körpers beruht, worauf wir später eingehen (87).

56. *Farbstoffgemische.* — Erwähnenswert sind die Farbenwirkungen gemischter Farbstoffe. Man muß darüber klar sein, daß das Mischen von zwei Farbstoffen nicht Mischen, nicht Addieren der von ihnen gelieferten Lichter bedeutet, sondern ein doppeltes Subtrahieren von Lichtern aus dem weißen Licht, das sie beleuchtet. Hat man etwa einen blauen Farbstoff (z. B. Berliner Blau) mit einem gelben (z. B. Gummigutt) gemischt, so unterliegt das weiße Licht, das das Gemisch durchsetzt, dem Absorptionsvorgang in *beiden* Farbstoffen, ehe es ins Auge gelangt. Der blaue Farbstoff entzieht ihm Gelb und Rot (der Rest, nämlich Grün, Blau und Violett, ist das „Blau" des Farbstoffes); der gelbe Farbstoff entzieht dem Licht Blau und Violett (der Rest von weißem Licht,

nämlich Rot, Gelb und Grün, ist das „Gelb" des Farbstoffes, vgl. 53). Da im Gemisch beide Farbstoffe wirken, bleibt vom weißen Licht nichts übrig als das Grün, und daher wirkt das Gemisch des blauen und des gelben Farbstoffes als grüner Farbstoff. Blaues und gelbes Licht würden gemischt — wir haben sie schon als komplementär kennengelernt (53) — Weiß für das Auge geben.

Farbendrucke (Buntdrucke) werden mit der Buchdruckerpresse hergestellt, indem man dreierlei Farbenbilder übereinander druckt. Die dabei zu verwendenden 3 Farbstoffe müssen, der Eigentümlichkeit des Auges entsprechend, so gewählt sein, daß sie die 3 oben (53, 5 u. 6) genannten Wellenlängen und deren (verwaschene) spektrale Umgebung absorbieren, d. i. der Reihe nach: das rotgelbe Spektralende, die spektrale Mitte, das blauviolette Spektralende. Die 3 Farbstoffe geben, einzeln auf weißes Papier aufgetragen, für das Auge der Reihe nach: Grünlichblau, Purpur, Gelb, entsprechend den von ihnen durchgelassenen Teilen des auffallenden weißen Lichtes (54). Durch zusammenwirken dieser Farbstoffe im Aufeinanderdruck entstehen alle übrigen Farbeneindrucke, wovon man sich durch Überlegung, wie oben beim blauen und gelben Farbstoff, leicht überzeugt. Alle 3 Farbstoffe zusammen geben Schwarz, weil dann alle Wellenlängen absorbiert werden. Fehlen aller 3 Farbstoffe gibt das Weiß des Papiers. Zwischenstufen der Helligkeit und Farbentönungen werden durch verschieden starkes Auftragen der 3 Farbstoffe erreicht[1]).

Farbenphotographie. Die für solche Buntdrucke nötigen Druckplatten werden nach photographischen Aufnahmen der betreffenden Gegenstände hergestellt. Es sind 3 Aufnahmen nötig, bei welchen je nur diejenigen Wellenlängen wirken müssen, die von den genannten 3 Farbstoffen absorbiert werden. Dies kann durch vorgeschaltete farbige Schichten („Farbfilter"), aber auch durch geeignete Sensibilisierung (97) der photographischen Schichten erreicht werden. Ist der Gegenstand bewegt, so müssen die 3 Aufnahmen gleichzeitig sein. Man kann aber sogar die 3 photographischen Schichten aufeinander gelegt zu einer einzigen Schicht vereinigen und somit mit einer einzigen Aufnahme auskommen. Richtet man es durch chemische Kunstgriffe bei der Herstellung der Schichten und bei der Bildentwicklung so ein, daß das unbelichtete Silberhaloid schließlich je den Farbstoff annimmt, für den die betreffende Schicht dienen soll, und daß alles Silber aus der Schicht gelöst wird, so gibt die dreifache Schicht nach fertiger Entwicklungsbehandlung sofort in der Durchsicht ein richtiges farbiges Bild des Gegenstandes. Das Bild kann auch vergrößert projiziert werden („Farbfilm"). Farbige Kopien können nach demselben Grundgedanken der dreifachen Schicht in Vervielfältigung auf Papier hergestellt werden, das mit den 3 Schichten versehen ist.

g) Linsen und optische Geräte.

57. Die Linsen der Optik sind kugelig begrenzte, durchsichtige Körper, in der Form oft an die Hülsenfrucht gleichen Namens erinnernd; sie sind die wichtigsten optischen Bilderzeuger und Bestandteile aller optischen Geräte (Instrumente).

Jede Linse hat zwei Krümmungsradien; dies sind die Halbmesser der Kugeln, von welchen ihre zwei Oberflächen Teile sind. Die Verbindungslinie der beiden Kugelmittelpunkte heißt Achse der Linse.

Die wichtigsten Anwendungen finden die „Sammellinsen"; sie sind in der Mitte dicker als am Rande[2]); sie machen paralleles Licht konvergent, sammeln es.

---

[1]) Dies geschieht durch verschieden stark punktierte Verteilung der Farbstoffe („Raster"). Tiefste Schwärze, Kontrastwirkungen und Konturen werden durch einen zusätzlichen schwarzen Aufdruck beigebracht.

[2]) Man nennt die Sammellinsen auch „Konvexlinsen" (nach außen gewölbte Linsen). Es kommt aber nicht so sehr auf die Wölbung nach außen an; es kann auch eine der begrenzenden Flächen eben oder sogar hohl sein. Wenn nur die Linse in der Mitte dicker ist als am Rande, wird sie immer als Sammellinse wirken, wie das Folgende zeigt.

Die „Zerstreuungslinsen“ — in der Mitte dünner als am Rande — machen das parallele Licht divergent; sie wirken lichtzerstreuend. Wir werden in der Hauptsache die Sammellinsen betrachten; die entgegengesetzten Eigenschaften der Zerstreuungslinsen verstehen sich dann fast ohne weiteres.

58. Um den Strahlenlauf in einer Sammellinse zu überblicken, denke man sie in Prismen zerschnitten (Abb. 23). Das Prisma a b c bricht den vom leuchtenden Punkt A kommenden Strahl nach der stumpfen Seite hin (44), so daß er etwa gegen B geht. Der auf das nächste Prisma b c d e fallende Strahl wird weniger abgelenkt werden, weil diesem Prisma ein kleinerer Winkel zugehört, der nächste Strahl im folgenden Prisma aus demselben Grunde noch

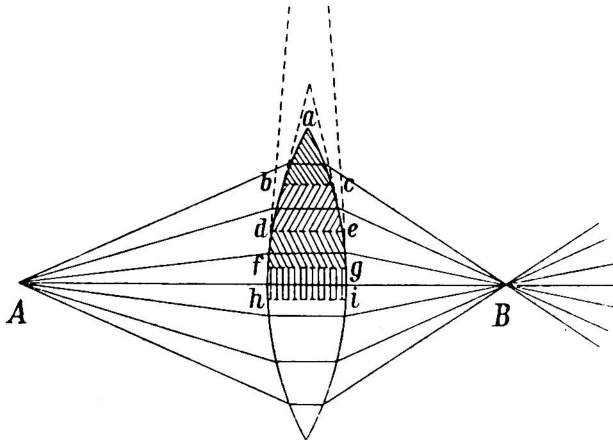


Abb. 23. Brechung in Linsen.

weniger, und dies könnte wohl so sein, daß alle gebrochenen Strahlen genau oder doch nahezu nach B kommen; jedenfalls kommt der auf die Mitte der Linse fallende Strahl dorthin, weil er senkrecht auftrifft und also geradlinig durchgehen muß. Man sieht damit unmittelbar die lichtsammelnde Wirkung des linsenförmigen, zum Lot brechenden Körpers.

Bemerkt sei übrigens für alle Fälle, daß die Mitte jeder Linse, als planparallele Platte f g h i, auch bei schiefem Strahl keine Änderung der Strahlrichtung gibt, sondern nur eine kleine, der Linsendicke entsprechende Parallelverschiebung (vgl. Abb. 21). Wir werden in allem Folgenden die Linsendicke verschwindend klein annehmen im Vergleich zu allen anderen in Betracht kommenden Abmessungen in Achsenrichtung. Es kann dann jeder durch die Linsenmitte gehende Strahl einfach als geradlinig weitergehend betrachtet werden (vgl. Note zu 61).

59. Kugelfehler. — Kennt man die beiden Krümmungsradien der Linse und den Brechungsexponenten ihres Stoffes, so können alle von einem gegebenen Punkte A ausgehenden Strahlen durch Rechnung nach dem Brechungsgesetz verfolgt werden. Man findet, daß das Zusammentreffen der Strahlen nach Durchsetzung der Linse mangelhaft ist; sie kommen nur ungefähr in einem Punkte zusammen, nicht genau. Abb. 24 zeigt den genauen Lauf für einen bestimmten

Fall. Die nahe der Mitte der Linse laufenden Strahlen — die „Zentralstrahlen" — kommen wohl nahe in einem Punkte zusammen. Die Strahlen vom Rande der Linse aber — die „Randstrahlen" — werden verhältnismäßig zu stark gebrochen;

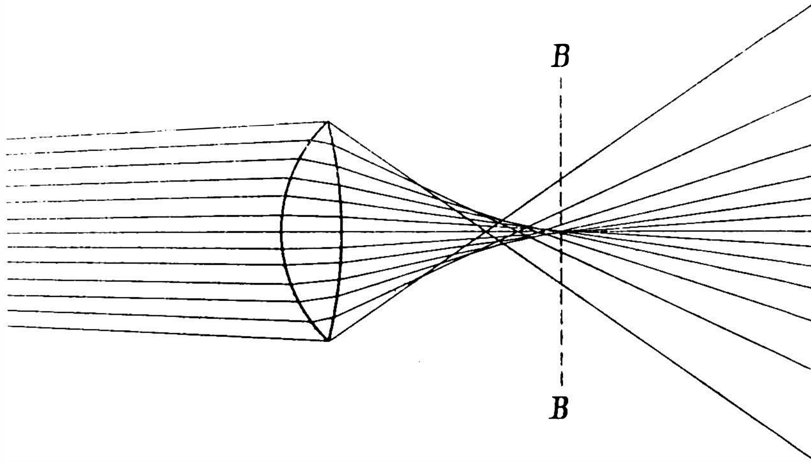


Abb. 24. Kugelfehler (Sphärische Aberration).

sie vereinigen sich näher der Linse als die Zentralstrahlen. Die Sammelwirkung kugeliger Linsen — und diese sind am leichtesten zu schleifen — ist also unvollkommen.

Der Fall ist ganz ähnlich dem der kugeligen Hohlspiegel (30): auch die Linsen haben ihren „Kugelfehler", ihre „sphärische Aberration"; homozentrisches Licht

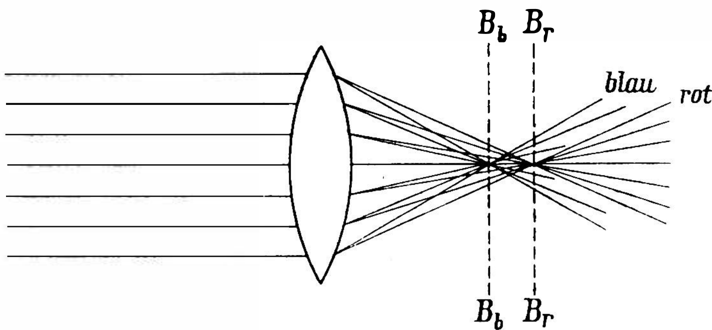


Abb. 25. Farbfehler (Chromatische Aberration).

bleibt nach ihrer Durchsetzung nicht homozentrisch. Dies macht die von kugeligen Linsen entworfenen Bilder (12) verwaschen. Ein bei B B (Abb. 24) aufgestellter Schirm wird wohl einen leuchtenden Punkt zeigen, als Bild des auf der anderen Seite der Linse befindlichen Gegenstandspunktes, jedoch umgeben von einem verwaschen begrenzten Hof.

60. Farbfehler. — Es ist aber bei den Linsen noch ein anderer Umstand zu beachten, der die Bilder verdirbt: der „Farbfehler" oder die „chromatische Aberration". Die Brechung in der Linse ist nämlich, wie jede Brechung, mit

Farbenzerstreuung verbunden. Fällt beispielsweise paralleles weißes Licht auf eine Linse (Abb. 25), welche wir vom Kugelfehler frei annehmen wollen, so wird jedes der Strahlenbündel in sein Spektrum zerlegt; alle roten Strahlen werden mit geringerer Brechung aus der Linse kommen, alle blauen mit stärkerer, und die zwischenliegenden Farben dazwischen. Jede Farbe hat daher ihren besonderen Bildpunkt. Die Folge davon ist, daß das Gesamtbündel nur in seinen mittleren Teilen, wo alle Farben vorhanden sind, weiß erscheinen kann, an den Rändern aber gefärbt sein wird

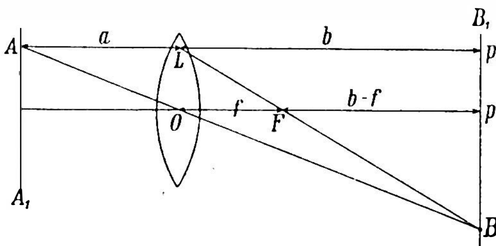


Abb. 26. Bildermittelung durch Zeichnung.

(vgl. 50). Ein Schirm bei B_r, wo der rote Bildpunkt ist, zeigt ein verbreitertes weißes Bild mit blauem Rand; beim blauen Bildpunkt B_b findet man rote Umrandung. Man erhält immer unscharfe, mehr oder weniger farbig umrandete Bilder, wo der Schirm auch sei.

61. Brennpunkt, Brennweite. — Man hat verhältnismäßig spät gelernt, die Mängel der Linsen bei der Bilderzeugung zu beseitigen. Wir werden darauf eingehen (71, 72), nachdem wir erst die Haupttatsachen der Bilderzeugung — abgesehen von den Mängeln — vorgebracht haben werden. Wir nehmen daher für jetzt an, daß Linsenbilder von Punkten immer wieder Punkte sind, daß homozentrisches Licht nach Durchsetzung einer Linse wieder homozentrisch ist und daß auch kein Farbfehler auftritt.

Grundlage zur Beantwortung aller Fragen über die Bilder einer Linse ist die Kenntnis der „Brennweite" der Linse. Man läßt parallele Strahlen in Achsenrichtung auf die Linse fallen — etwa Sonnenstrahlen oder Strahlen einer fernen irdischen Lichtquelle — und sucht ihren Vereinigungspunkt auf einem Schirm. Dieser Vereinigungspunkt liegt auf der Achse der Linse und wird ihr „Brennpunkt" genannt (F in Abb. 27, 1). Der Name hat den gleichen Ursprung wie beim Hohlspiegel (30). Der Abstand des Brennpunktes von der Linse heißt ihre Brennweite (f).

Da wir die Linsendicke klein annehmen (58), kommt es bei Abstandsmessungen von der Linse nicht auf deren Vorder- oder Hinterfläche an, sondern es wird einfach vom Mittelpunkt der Linse aus (O in Abb. 26) gemessen. So auch für die Brennweite. Feinere Betrachtung ist für Hersteller optischer Instrumente keineswegs ohne Wichtigkeit, lehrt aber nichts wesentlich Neues[1]).

Jede Linse hat zwei Brennpunkte, da sie von jeder ihrer beiden Seiten her benutzbar ist (vgl. 1 u. 5 in Abb. 27, wo in allen Fällen die Strahlen ebensogut von rechts nach links als von links nach rechts laufend gedacht werden können); doch hat sie in unserer vereinfachten Betrachtung nur einerlei Brennweite f; die beiden Brennpunkte stehen beiderseits in diesem Abstand f von der Linse, wie in Abb. 27.

---

[1]) Die verfeinerte Betrachtung berücksichtigt die Dicke der Linse (bez. eines Linsensystems, 75) und zugleich etwaige Ungleichheit ihrer beiden Krümmungsradien, indem sie den Linsenmittelpunkt durch zwei Punkte ersetzt und die Linsenflächen durch zwei Ebenen („Knotenpunkte", „Hauptebenen").

Kennt man die beiden Krümmungsradien r_1 und r_2 (für Wölbung nach außen positiv gerechnet) und den Brechungsexponenten n des Stoffes einer Linse, so gilt (als Folge des Brechungsgesetzes) für die Brennweite f die Gleichung

$$1/f = (n-1)(1/r_1 + 1/r_2). \qquad 61)$$

Sie zeigt zahlenmäßig, was in der Hauptsache schon aus der vorausgestellten Überlegung (58) klar ist: daß starke Lichtbrechung (n—1) sowie kleine Krümmungsradien (starke Wölbung nach außen) kurze Brennweite geben. Doch kommt man nicht in den Fall, hiernach die Brennweite einer fertigen Linse zu ermitteln, sondern es wird dies immer durch einen Versuch mit der Linse geschehen.

62. Gegenstandsweite und Bildweite. — Erste Frage über Linsenwirkung ist immer die nach dem Ort des Bildes bei gegebenem Ort eines Gegenstandes. Dabei gehen wir zunächst wieder, wie bei allen Bildüberlegungen, von einem leuchtenden Punkt als Gegenstand aus. Da alle von einem Punkt ausgehenden Strahlen nach Durchsetzung der Linse wieder in einem Punkt sich vereinigen (oder von einem solchen divergieren) sollen, genügt es, den Lauf zweier Strahlen zu kennen; wo diese sich schneiden muß dann der Vereinigungspunkt aller Strahlen, also das Bild des Punktes sein. Man wählt diejenigen beiden Strahlen aus, deren Lauf am einfachsten vorauszusagen ist, nämlich 1. einen achsenparallelen Strahl und 2. einen durch den Mittelpunkt der Linse gehenden Strahl. Jeder achsenparallele Strahl läuft nach Durchsetzung der Linse durch den Brennpunkt (der anderen Seite); jeder Mittelpunktsstrahl geht geradlinig durch die Linse (61, 58).

Damit ist der Weg gegeben, in jedem Falle sogleich das Bild irgendeines Gegenstandspunktes zu ermitteln. Es sei (Abb. 26) A A_1 die senkrecht zur Linsenachse stehende Ebene, in welcher ein gegebener Gegenstand sich befindet, die „Gegenstandsebene"; ihr Abstand a von der Linse wird die „*Gegenstandsweite*" genannt. A sei ein beliebig gelegener Punkt des Gegenstandes. Wir ziehen den achsenparallelen Strahl A L, der nachher durch den Brennpunkt F weiterläuft, und den Mittelpunktsstrahl A O, der nachher geradlinig weiterläuft. Beide schneiden sich in B, und dort wird also das Bild von A sein. Die Ebene BB_1, in welcher auch die Bilder der anderen Punkte des in der Ebene AA_1 befindlichen Gegenstandes sich finden, heißt die „Bildebene"; ihr Abstand b von der Linse ist die „*Bildweite*".

Diese für alle Fälle geeignete zeichnerische Ermittelung des Bildortes kann auch durch eine ebenfalls allgemeingültige Rechnung ersetzt werden. Es kommt darauf an, eine Gleichung zu finden, welche a, b und f miteinander verbindet. Dies geschieht in einfacher Weise, wenn man den (aus Dreiecksähnlichkeiten leicht nachzuweisenden) Satz der Geometrie benutzt: daß 2 parallele Geraden (in unserem Falle Ap_1 und Op), durchschnitten von anderen Geraden, die von einem Punkte ausgehen (in unserem Falle BA, BL, BB_1), in proportionale Teile zerfallen. Danach muß $a : b = f : (b-f)$ sein, was umgerechnet (nach Multiplikation der äußeren und der inneren Glieder und Division durch $a \cdot b \cdot f$) die *Hauptgleichung der Linsen* gibt:

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}, \qquad 62)$$

in Worten: Reziproke Gegenstandsweite und reziproke Bildweite geben zusammen stets die reziproke Brennweite.

Dies ist die a, b und f verbindende Gleichung, aus welcher zu jeder gegebenen Gegenstandsweite a bei bekannter Brennweite f stets die Bildweite b berechenbar ist. Tab. 37 gibt eine Übersicht aller Hauptfälle, die dabei auftreten, und Abb. 27 stellt die Strahlengänge dar. Ist a = ∞, so wird b = f, d. h. parallele Strahlen treffen sich im Brennpunkt. So muß es sein; denn von diesem Fall gingen wir aus (Abb. 27, 1). Rückt der Gegenstand näher zur Linse, so entfernt sich das Bild von ihr (Abb. 27, 2). Ist dann a = 2f geworden, so ist auch b = 2f (Abb. 27, 3). Bei noch weiterem Heranrücken des Gegenstandes bewegt sich das Bild noch weiter weg (Abb. 27, 4). Ist der Gegenstand im Brennpunkt angelangt (a = f), so ist das Bild ins Unendliche gerückt (b = ∞, Abb. 27, 5)[1]. Bei noch weiterer Annäherung des Gegenstandes an die Linse (a < f) wird b negativ, was bedeutet, daß das Bild jetzt an die andere Seite der Linse, d. i. an die Seite des Gegenstandes gegangen ist. Da dort die aus der Linse kommenden Strahlen gar nicht hinlaufen, so muß das Bild jetzt virtuell sein; nur die Rückverlängerungen der Strahlen treffen in B zusammen (Abb. 27, 6), und ein im Strahlengang befindliches Auge sieht dort das Bild (29). Dasselbe bleibt dann auch weiter virtuell bis endlich der Gegenstand dicht an die Linse gekommen ist (a = 0), wobei auch das Bild eben dort anlangt (b = —0). Alle vorherigen Bilder waren dagegen reell, auf Schirmen auffangbar (vgl. 12 und 29); denn sie waren dort, wo die Strahlen hinlaufen, auf der dem Gegenstand abgekehrten Seite der Linse.

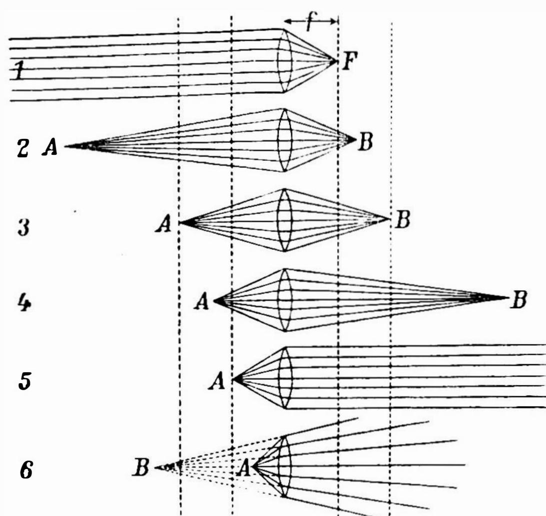


Abb. 27. Hauptfälle der Bilder einer Sammellinse.

Sehr bemerkenswert sind die betrachteten Wege des Gegenstandes und seines Bildes: Der Gegenstand kam aus dem Unendlichen bis an die Linse heran (a = ∞ bis a = 0). Das Bild bewegte sich dabei ebenfalls dauernd in der gleichen Richtung, ausgehend vom Brennpunkt zunächst bis ins Unendliche, kehrte dann — immer in gleicher Richtung sich bewegend — von der anderen Seite aus dem Unendlichen wieder, bis es schließlich gleichzeitig mit dem Gegenstand an der Linse anlangte.

Unmittelbar deutlich wird die für alle Brechung geltende Umkehrbarkeit des Lichtweges (34) auch bei den Linsen. Abb. 27 1 und 5, 2 und 4, sowie 3

[1] In dieser Anwendung, zum Parallelmachen divergenten Lichtes, nennt man die Linse „Kollimator" (vgl. 44, 70). Bei Anwendung in großem Maßstab wirkt sie so als „Scheinwerfer", gleich dem Hohlspiegel (30, 31); sie kann dabei aus prismatischen Stücken zusammengesetzt sein.

zeigen Beispiele davon, und Gl. 62 zeigt dasselbe durch die Vertauschbarkeit von a und b ohne Änderung der Gültigkeit.

63. Stellung und Größe der Linsenbilder. — Wichtig sind noch die

Tab. 37. **Linsenbilder.**

Gegenstandsweite a	Bildweite b	Bildbeschaffenheit		
∞	f	reell	verkehrt	verkleinert
2 f	2 f			gleichgroß
f	∞			vergrößert
<f	negativ	virtuell	aufrecht	
0	—0			gleichgroß

Fragen nach Aufrechtstehen oder Verkehrtsein und nach Vergrößerung oder Verkleinerung der Bilder. Die Beantwortung derselben ist höchst einfach; denn wenn der Ort des Bildes — nach vorigem — bereits bekannt ist, genügt ein einziger Strahl um zu jedem Gegenstandspunkte den Bildpunkt zu finden. Man wählt dazu den am einfachsten laufenden Strahl, den geradlinigen Mittelpunktsstrahl.

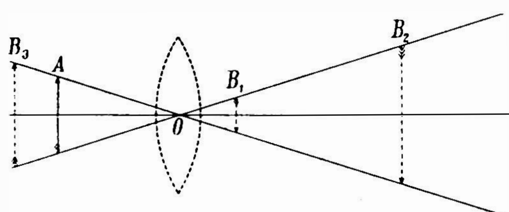


Abb. 28. Bildgröße und Lage je nach Abstand von der Linse.

Es sei der Gegenstand bei A (Abb. 28). Da die von seinen beiden Enden ausgehenden Mittelpunktsstrahlen jedenfalls in O sich kreuzen, wie groß auch die Brennweite der Linse sei, so sieht man, daß jedes auf der anderen Seite der Linse entstehende, also **jedes reelle Bild verkehrt** sein muß (z. B. B_1 und B_2 in Abb. 28), daß dagegen jedes auf gleicher Linsenseite mit dem Gegenstand befindliche, also **jedes virtuelle Bild aufrecht** sein muß (B_3 in Abb. 28), wie es auch Tab. 37 angibt.

Gleichzeitig sieht man aus Abb. 28, daß die **Größe des Bildes** allein nur von dessen Abstand b von der Linse abhängig ist. Die Bildgröße muß geradezu proportional der Bild weite b sein. Verglichen mit dem Gegenstand wird das Bild verkleinert sein, wenn $b < a$ (z. B. B_1 in Abb. 28), vergrößert, wenn $b > a$ (B_2 und B_3 in Abb. 28) und gleich groß, wenn $b = a$. Auch diese verschiedenen Fälle finden sich in der Tab. 37 zusammengestellt.

Man sieht die reichen Möglichkeiten der Bilderzeugung durch Sammellinsen. Daher deren vielfache Anwendungen in den optischen Geräten. Wir beschreiben dieselben nur kurz, da alles zu ihrem Verständnis Nötige in der Hauptsache bereits gesagt ist.

64. Auge und Lichtbildkammer. — Mit dem Strahlengang von Abb. 27, 2 — verkleinertes, verkehrtes Bild — findet sich die Linse in den Augen der höheren Tiere und des Menschen. Das Bild wird auf der „Netzhaut" entworfen, wo die

lichtempfindlichen Enden der einzelnen Fasern des Sehnerven sind (vgl. 53). Daß wir mit jeder Lichtreizung eines bestimmten Nervenendes die Vorstellung eines in bestimmter Richtung außen im Raume befindlichen, lichtaussendenden Punktes verbinden — wozu die teilweise Bekanntschaft mit den zugehörigen Vorgängen im Auge nichts beiträgt und woran die Unbekanntschaft mit den weiteren Vorgängen in den Nerven und im Gehirn nichts ändert —, dies ist Folge der in früher Kindheit durch Greifen nach sichtbaren Gegenständen erlangten Erkenntnis und der damit verbundenen Übung im Gebrauch der Augen. Mit zwei Augen wird auch gelernt, die dem Abstand der beiden Augen im Kopfe entsprechende Verschiedenheit der beiden Netzhautbilder von Gegenstandsgruppen richtig als räumliches Hintereinander der Gegenstände zu deuten („stereoskopisches Sehen“).

In derselben Anwendung findet sich die Linse auch in der Lichtbildkammer (photographischen Kammer). Die Einstellung auf beste Bildschärfe erfolgt da durch Aufsuchung der richtigen Bildweite. Beim Auge erfolgt sie durch Umformung der aus elastischem Knorpelgewebe bestehenden Linse, so daß ihre Brennweite zum Abstand der Netzhaut und zur Gegenstandsweite passend wird — „Akkomodation“ —, was unbewußt vor sich geht, so wie es unbewußt erlernt worden ist.

65. Keplers Fernrohr; Lupe. — Auch in den „Objektiven“ — Gegenstandslinsen, Dinglinsen — der Fernrohre findet sich die Sammellinse mit dem Strahlengang von Abb. 27, 2.

Die jetzt fast allein gebrauchte Fernrohreinrichtung stammt von Kepler. Die Gegenstandslinse entwirft ein reelles, verkehrtes, verkleinertes Bild des fernen Gegenstandes, welches mittels der „Okular“linse — Augenlinse — in Vergrößerung betrachtet wird. Die Okularlinse ist ebenfalls eine Sammellinse und zwar in der Anwendung von Abb. 27, 6, so daß sie ein virtuelles, vergrößertes Bild des vom Objektiv entworfenen reellen Bildes gibt, das dabei verkehrt bleibt. Dieses einfache Fernrohr gibt also verkehrte Bilder der äußeren Gegenstände.

In derselben Anwendung, wie im Okular von Keplers Fernrohr, findet man die Sammellinse auch für sich allein im Gebrauch als „Lupe“ (einfaches Vergrößerungsglas). Man sieht (Abb. 27, 6), daß man den mit der Lupe zu be-

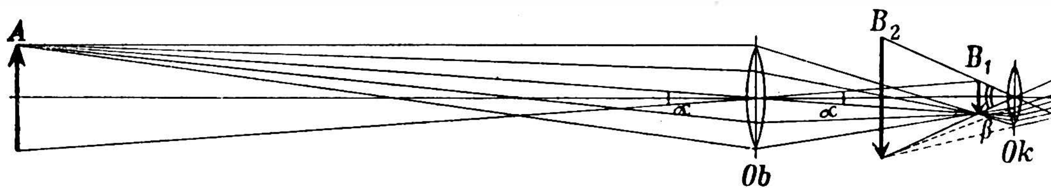


Abb. 29. Keplers Fernrohr.

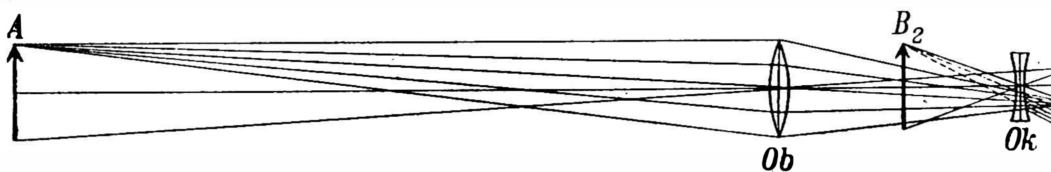


Abb. 31. Galileis Fernrohr.

trachtenden Gegenstand innerhalb deren Brennweite haben muß; die stärkste Vergrößerung erhält man, wenn der Gegenstand nahe dem Brennpunkt ist (vgl. Tab. 37).

So wird auch das Fernrohr richtig „eingestellt" sein, wenn das vom Objektiv (Ob, Abb. 29) entworfene reelle Bild B_1 des Gegenstandes A in den Brennpunkt des Okulares Ok fällt. Ein Schirm braucht nicht vorhanden zu sein, um das Bild B_1 aufzufangen; er würde nur zu Lichtverlust führen; sondern die Strahlen gehen unmittelbar weiter ins Okular und dann ins Auge des Beobachters. Es kann aber in der Bildebene B_1 ein Fadenkreuz oder eine Skale auf Glas angebracht sein, die man dann gleichzeitig mit dem Bild durch das Okular in Vergrößerung betrachtet und wie in das Bild B_2 des Gegenstandes eingezeichnet sieht. Hierauf beruhen die wichtigen Anwendungen von Keplers Fernrohr für Meßzwecke (vgl. 44).

Zur Beobachtung irdischer Gegenstände wünscht man meist aufrechte Bilder. Man kann zur Bildaufrichtung in Keplers Fernrohr eine Sammellinse mit dem Strahlengang von Abb. 27, 3 zwischen Objektiv und Okular einschalten, wobei allerdings das Fernrohr um die 4fache Brennweite dieser Linie verlängert wird. Oder man schaltet totalreflektierende Prismen ein (36), wie Abb. 30, die mit der Bildaufrichtung sogar eine Verkürzung des Fernrohres und zugleich die Möglichkeit einer seitlichen Verschiebung des Objektives gegen das Okular ergeben. Letzteres ermöglicht Um-die-Ecke-sehen und — bei zweiäugigen („binokularen") Fernrohren — eine verstärkte stereoskopische Wirkung (Bildverkörperung), indem der Abstand der Objektive größer gemacht werden kann als der Abstand der Augen im Kopfe (vgl. 64).

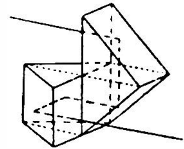


Abb. 30. Totalreflektierende Prismen mit Bildaufrichtung.

66. Galileis Fernrohr. — Das älteste Fernrohr benutzte eine Hohllinse (Zerstreuungslinse, 57) als Okular. Der Strahlengang ist in Abb. 31 dargestellt. Das reelle Bild B_1 kommt hier nicht zustande, sondern die vom Objektiv konvergent gemachten Strahlen (z. B. des obersten Punktes von A) treffen vorher die Okularlinse Ok, die sie divergent macht, so als wären sie von B_2 gekommen, wo somit ein virtuelles Bild des Gegenstandes gesehen wird. Das Bild ist auch hier im Vergleich zu B_1 vergrößert, und es steht ohne weiteres aufrecht.

Mit Fernrohren dieser Art hat Galilei zum erstenmal den Himmelsraum eingehender durchforscht als es je vorher möglich war. Er entdeckte, daß der Planet Jupiter Monde hat, die ihn umkreisen, wie der Erdmond die Erde, und er sah die Lichtgestalten der Venus, die nachweisen, daß sie kein selbstleuchtender Stern ist, sondern von der Sonne beleuchtet wie die Erde. Jupiter und Venus, die Planeten, und die Erde zeigten sich damit ganz offenbar nicht so grundverschieden voneinander im Himmelsraum dastehend, wie man es noch immer denken wollte. Noch weit überzeugender und eindringlicher als schon durch Pythagoras und Kopernikus war damit die Erde als ein Planet gleich den anderen Planeten gezeigt. Eine große Aufklärung über die Stellung des Menschen in der Welt war damit allen Wahrheitwollenden gebracht. Die geglaubte Mittelpunktsstellung des Menschen mit seiner Erde war, als nicht der Wirklichkeit entsprechend, aufzugeben. Aber um so mehr durfte sich nun der Geist des Menschen erheben, weg von der Erde, um die dem Auge jetzt besser zugänglich gewordenen Gebilde

des Himmelsraums weiter begreifen zu lernen. Seither stetig verbesserte und vergrößerte Fernrohre haben weit über unser Planetensystem, ja auch über das Milchstraßensystem hinausreichende Einsichten gebracht (M 203, 226, W 188, 189, O 27, 91, 154). Die Zahl der schon vermessenen oder doch auf photographischen Platten festgehaltenen Sonnen des Himmelsraums, die als gleichartig mit unserer Sonne erkannt sind, geht in Hunderte von Millionen; die Gesamtzahl — auch nur im Bereich der Sichtbarkeit — ist unzweifelhaft noch sehr viel größer. Nicht nur unsere Erde, unser ganzes Sonnensystem hat damit die ursprünglich gegeben erscheinende Einzigartigkeit verloren. Nicht wenige Sonnen in der gefundenen überwältigenden Fülle derselben mögen von Planeten umkreist sein, die ebenso, oder besser, den Bedingungen (W 86, 89, 186) des Gedeihens von organischem Leben genügen, wie die Erde.

67. Vorzüge von Keplers Fernrohr. — Vergleicht man die Strahlengänge in Keplers und in Galileis Fernrohr (Abb. 29 und 31), so bemerkt man einige Nachteile des letzteren, die es zuletzt fast ganz außer Gebrauch gebracht haben. Ein wesentlicher Nachteil ist das geringe Gesichtsfeld. Man sieht (Abb. 31), daß die vom obersten Punkt des Gegenstandes A zum Auge gelangenden Strahlen schräg nach unten aus dem Okular austreten, und entsprechend treten die vom untersten Punkt kommenden Strahlen nach oben aus; die am Okular befindliche Pupille des beobachtenden Auges kann also unmöglich beide Strahlenbündel gleichzeitig fassen, und das Auge kann demnach nur wenig vom Gegenstand auf einmal sehen. Ganz anders ist es bei Keplers Fernrohr (Abb. 29), wo sämtliche Strahlenbündel nach Durchsetzung des Okulars zusammenlaufen, so daß der Pupille ein Ort mitten beim Okular angewiesen werden kann, von wo aus ein möglichst großes Gesichtsfeld zu überblicken ist[1]. Mit dem geringen Gesichtsfeld ist aber beim alten Fernrohr außerdem geringe Lichtstärke und geringe Vergrößerungsmöglichkeit verbunden. Dazu kommt noch, daß es zu Meßzwecken nicht gut benutzt werden kann, da man mangels eines reellen Bildes im Rohr keine Marken, kein Fadenkreuz im Gesichtsfeld anbringen kann (vgl. 65).

68. Die Vergrößerungszahl eines Fernrohres — kurz auch „Vergrößerung" genannt — soll angeben, wieviel mal so groß es den fernen Gegenstand erscheinen läßt als er ohne Fernrohr erscheint. Gegenstands- und Bildgröße sind hierbei als Winkel zu messen. Der Scheitel jedes solchen Winkels, unter welchem das Auge irgend etwas sieht, liegt stets im Auge, und die Schenkel nehmen das Besehene zwischen sich. Der Winkel bestimmt die Größe des Netzhautbildes im Auge (entsprechend den in Abb. 28 gezeichneten Mittelpunktstrahlen) und damit auch die Größe, in welcher der Gegenstand (oder irgend ein Bild) gesehen wird. Besieht das Auge den Gegenstand A (Abb. 29) ohne Fernrohr, so sieht es ihn unter dem Winkel α; denn es ist beim großen Abstand des Gegenstandes gleichgültig, ob das Auge beim Objektiv oder beim Okularende des Fernrohres sich befindet. Das Bild im Fernrohr wird aber vom Auge unter dem Winkel β gesehen (in Abb. 29 mit 2 Bögen bezeichnet); denn das tatsächlich wirksame Bündel b ist der Linie b parallel, sobald B_1 im Brennpunkt des Okulars steht, was aber die stärkste Vergrößerung gibt. Man sieht, daß α und β an den Spitzen zweier schmaler, gleichschenkliger Dreiecke vorkommen, deren gemeinsame Grundlinie B_1 ist, und daß sie sich demnach umgekehrt wie die Höhen dieser Dreiecke verhalten werden. Diese Höhen sind aber die beiden Brennweiten f_1 des Objektivs[2]) und f_2 des Okulars. Somit ist die Vergrößerung des Fernrohres,

$$\beta/\alpha = f_1/f_2, \qquad 68)$$

gegeben durch das Verhältnis der Brennweite des Objektives zu der des Okulars.

Für sehr starke Vergrößerung muß daher die Brennweite des Objektivs sehr groß, die des Okulars sehr klein sein. Das Fernrohr wird dadurch lang; denn seine Gesamtlänge ist hauptsächlich durch die Objektivbrennweite bestimmt.

---

[1]) Man sieht aus Abb. 29 leicht, wenn man vom Mittelpunkt des Objektives ausgehende Strahlen verfolgt, daß der günstigste Ort für die Pupille dort liegt, wohin das Okular ein reelles Bild des Objektivs entwerfen würde. An diesem Ort befindet sich (wenn er nicht sehr dicht beim Okular liegt) bei gut ausgeführten Fernrohren eine besondere Blende, an die das Auge dicht heranzubringen ist.

[2]) Denn der sehr ferne Gegenstand bildet sich sehr nahezu im Brennpunkt des Objektives ab.

Solange man die Bildfehler der Linsen (59, 60), besonders den Farbfehler nicht zu beseitigen wußte, waren sehr starke Vergrößerungen, wie sie zu fortgesetzten Forschungen im Himmelsraum nötig wurden, bei Linsenfernrohren nicht benutzbar. Man ging daher zu Spiegelfernrohren über, bei denen das Objektiv ein Hohlspiegel ist. Auch heute noch hat das Spiegelteleskop, der „Reflektor" den Vorzug, leichter mit großem Objektivdurchmesser, d. i. mit großer Lichtstärke herstellbar zu sein als das Linsenfernrohr, der „Refraktor".

69. Das Mikroskop geht aus dem Fernrohr hervor, wenn man beim Objektiv vom Strahlenweg Abb. 27, 2 zum Strahlenweg Abb. 27, 4 übergeht. Der Gegenstand A (Abb. 32) ist dann nahe dem Brennpunkt des Objektivs Ob, und das reelle, verkehrte Bild B_1 ist bereits stark vergrößert. Das Okular Ok ist dasselbe wie bei Keplers Fernrohr; es gibt als Lupe das virtuelle Bild B_2 und bringt damit noch eine Vergrößerung hinzu. In der Bildebene B_1 können wieder Meßvorrichtungen angebracht werden (vgl. 65).

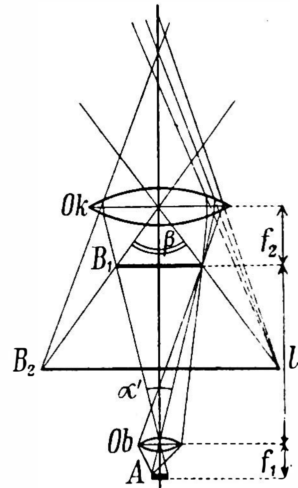


Abb. 32. Mikroskop.

Die Vergrößerung ist auch beim Mikroskop als Verhältnis der Winkelgrößen eines Gegenstandes, gesehen mit und ohne Mikroskop, anzugeben; jedoch muß hier eine Festsetzung über den Abstand getroffen werden, in welchem der Gegenstand ohne Mikroskop zu besehen sei, da mit dem Abstand seine Winkelgröße sich ändert. Man hat dafür 25 cm als die „normale deutliche Sehweite" festgesetzt. Zur Berechnung der Vergrößerung sieht man zunächst (Abb. 32), daß (ähnlich wie beim Fernrohr) $\beta/\alpha' = l/f_2$ ist, wobei l (bei einigermaßen starker Vergrößerung) nahe die Rohrlänge des Mikroskops und f_2 die Okularbrennweite ist. α', der Winkel, unter welchen man den Gegenstand im Abstand der Objektivbrennweite f_1 sähe, ist noch auf den Winkel α in 25 cm Abstand umzurechnen, wobei (wieder mit zwei gleichschenkligen Dreiecken, die den Gegenstand zur gemeinsamen Grundlinie haben) $\alpha'/\alpha = 25\,\text{cm}/f_1$ ist. Beide Gleichungen zusammen ergeben die Vergrößerung des Mikroskops

$$\beta/\alpha = 25\text{cm} \cdot l/f_1 f_2, \qquad 69)$$

wobei alle Längen in cm zu messen sind. Es wächst also beim Mikroskop die Vergrößerung mit Verkürzung beider Brennweiten, f_1 und f_2; außerdem kann sie bei ungeänderten Linsen durch Steigerung von l mittels Ausziehens des Rohres gesteigert werden.

Der Verwertung stärkster Vergrößerungen ist indessen eine Grenze gesetzt dadurch, daß bei sehr kleinen Gegenständen die Beugungserscheinungen (140) wesentlich werden, die beim Vorbeigehen des beleuchtenden Lichtes an den Gegenständen auftreten. Man ist dann an den Grenzen der geometrischen Optik angelangt (6, 18), wo die einfache geradlinige Ausbreitung des Lichtes nicht mehr gilt. Die dann erforderliche Berücksichtigung der Wellennatur des Lichtes zeigt, daß ein Gegenstand, der kleiner ist als etwa die Wellenlänge des benutzten Lichtes, nicht mehr sicher formgetreu abgebildet werden kann (144, 151). Man nimmt als äußerste Grenze formgetreuer Abbildungsmöglichkeit ½ Wellenlänge an[1]), das wäre beim kürzestwelligen sichtbaren Licht, dem violetten, 0·0002 mm. Kleinere Gegenstände kann man zwar noch als leuchtende Punkte

[1]) Füllt man den Raum vom Gegenstand bis zum Objektiv mit einer Flüssigkeit vom Brechungsexponenten 2 aus („Immersion"), so kommt man zur halben Wellenlänge (wegen der halbierten Lichtgeschwindigkeit, vgl. 41, 52). Solche Immersion hat auch andere Vorteile (größere Lichtstärke, Beseitigung der Unvollkommenheiten von Deckgläsern auf den Gegenständen).

oder Scheibchen sehen und also etwa auch abzählen, wenn man sie seitlich sehr intensiv beleuchtet („Dunkelfeldbeleuchtung", „Ultramikroskop"), aber ohne ihre Form und Größe nach dem Bilde beurteilen zu können. Wendet man 2000fache Vergrößerung an (die mit geeigneten Linsen gut erreichbar ist), so erscheint der angegebene kleinste, etwa noch formgetreu abgebildete Gegenstand 0·4 mm groß. Kleinere Einzelheiten im Bilde können zwar noch gesehen, aber nicht ohne weiteres ernst genommen werden. Man sieht daraus, daß Vergrößerungen über 2000 Vorsicht bei Beurteilung der Bilder verlangen. Die Verwendung wesentlich kürzerwelligen (ultravioletten) Lichtes kann entsprechend weiterführen[1]).

Bedenkt man, daß selbst vielatomige Moleküle 1000mal kleiner sind als die sichtbaren Lichtwellen (siehe M Tab. 1 und W 106) und auch die allergrößten Moleküle (W 86) wohl noch mehr als 100mal kleiner als diese Wellen, so sieht man die besonders für die Kenntnis von den Lebewesen belangreiche Lücke zwischen den kleinsten mikroskopisch untersuchbaren und den größten chemisch untersuchten Gebilden.

70. Der Spektralapparat oder das Spektroskop dient zur Zerlegung gegebenen Lichtes in seine verschiedenfarbigen Wellenlängenbestandteile (52). Hauptteil ist immer das Prisma. Es kommt aber auf die Hervorbringung reiner Spektren (50) bei doch möglichst großer Lichtstärke an. Dazu muß zum Lichteinlaß eine sehr enge Spalte benutzt werden, von der eine Linse ein reelles Bild durch das Prisma hindurch entwirft, dessen Kante der Spalte parallel stehen muß. Prisma und Linse können dabei dicht zusammenstehen. Man erhält dann so viele reelle Spaltbilder nebeneinander, als das zu untersuchende Licht verschiedene Wellenlängen enthält, und die Gesamtheit dieser Spaltbilder macht eben das Spektrum aus (46 u. f.). Sind Wellenlängen sehr geringen Unterschiedes im Gemisch vorhanden, so liegen ihre Spaltbilder entsprechend dicht beieinander, und wäre die Breite des Spaltbildes nicht kleiner als ihr Abstand, so würden sie einander decken; das Spektrum wäre dann nicht rein genug zu ihrer Trennung. Deshalb muß die Spalte möglichst eng sein. Die Lichtstärke kann dennoch gesteigert werden, wenn Linse und Prisma groß gemacht und das divergent von der Spalte ausgehende Licht voll ausgenutzt werden. In dieser Weise können Spektren in großer Reinheit und Intensität auf einem Schirm erhalten werden, als durch das Prisma hindurch entworfene reelle Spaltbilder.

An Stelle von einer Linse werden für feinste Zwecke deren zwei benutzt, an beiden Seiten des Prismas stehend; die erste macht dann das vom Spalt divergierende Licht parallel („Kollimator", 62 Note), die zweite entwirft das Spektrum. Es würde nämlich das Prisma die Homozentrizität des Lichtes und damit scharfe Spaltabbildung verderben, wenn es nicht paralleles Licht erhielte[2]).

Wird zu subjektiver Beobachtung des Spektrums eine Lupe hinzugesetzt, so hat man ein vollständiges Fernrohr hinter dem Prisma mit der bildentwerfenden Linse als Objektiv und der Lupe als Okular (vgl. 44).

Fällt monochromatisches Licht in das Spektroskop, so erhält man nur ein einziges Spaltbild, eine „Spektrallinie"; sind alle Wellenlängen da, so hat man eine ununterbrochene Reihe aneinanderschließender Spaltbilder, jedes in

---

[1]) Noch sehr viel weiter führt das Elektronenmikroskop (E 452, Note).

[2]) Es ist bemerkenswert, daß sogar schon nach der Brechung an einer einzigen ebenen Grenzfläche homozentrisches, nicht paralleles Licht nicht mehr homozentrisch ist, was um so mehr hervortritt je schiefer der Einfall ist.

seiner Farbe, ein „kontinuierliches Spektrum". Die Lagen von Spektrallinien können an einer Skale im Gesichtsfeld des Fernrohrs oder an sonstiger Meßvorrichtung festgehalten werden, die auch in Wellenlängen geeicht werden kann.

71. Die Vollkommenheit der optischen Geräte hängt ganz von der Beseitigung der beiden Abbildungsfehler der Linsen, des Kugelfehlers und des Farbfehlers ab (59, 60).

Der Kugelfehler der Linsen kann in dreierlei Weisen beseitigt oder vermindert werden:

1. durch besondere Formung der Linse, abweichend von der Kugelform. Dies wird für alle feinen optischen Instrumente durchgeführt (vgl. 123, Note), in denen jede Linse nur für wenig verschiedene Gegenstandsweiten benutzt wird. Eine für jede beliebige Gegenstandsweite fehlerfreie Linsenform gibt es ebenso wenig wie eine solche Hohlspiegelform (31).

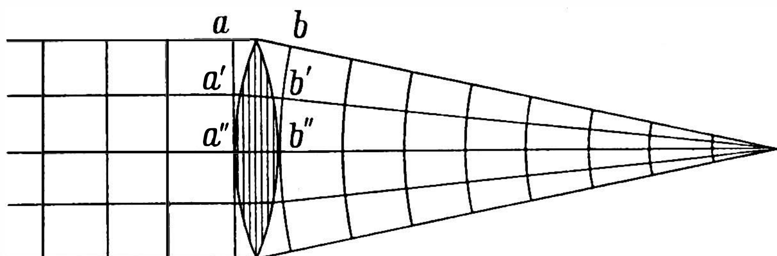


Abb. 33. Linse sammelt ohne Gangunterschied.

Ist die Linse für einen gegebenen Fall, z. B. für paralleles Licht richtig geformt, so daß sie homozentrische Konvergenz gibt, so gibt sie dementsprechend auch genau kugelförmige Wellenfronten (38), die zu einem Punkte zusammenlaufen, wie es Abb. 33 zeigt. Es müssen hier a b, a' b', a'' b'' Lichtwege gleicher Zeiten sein, was trotz der ungleichen Länge dieser Wege dadurch möglich ist, daß das Licht im Stoff der Linse — entsprechend seinem Brechungsexponenten — langsamer läuft als in Luft (41, 42).

2. Eine sehr einfache Möglichkeit, die Wirkung des Kugelfehlers in den Linsenbildern zu mindern, besteht im Abblenden der zu stark gebrochenen Randstrahlen (vgl. Abb. 24); ist viel Licht vorhanden, so ist das immer nützlich. Es kommt dies im Auge zur Anwendung, wo die „Regenbogenhaut" („Iris") als Blende wirkt, die beim Einfallen sehr intensiven Lichtes selbsttätig ihre Öffnung, die „Pupille" verengt, was das Bild verbessert, besonders aber auch die Netzhaut vor Schaden bewahrt.

3. Linsensysteme. — Benutzt man statt einer Linse deren zwei oder mehrere in dichter Hintereinanderstellung, so wirken sie wie eine einzige Linse von bestimmter Brennweite f, die aus den Brennweiten f_1, f_2, ... der Einzellinsen berechenbar ist nach der Gleichung $1/f = 1/f_1 + 1/f_2 + \ldots$.. Dabei hat man durch die Vermehrung der in Betracht kommenden Krümmungsradien allerlei Möglichkeiten, nicht nur in der Achse, sondern auch für Bilder am Rande des Gesichsfeldes homozentrische Konvergenz zu sichern, außerdem auch noch weitere Bedingungen zu erfüllen, wie etwa die, daß gerade Linien stets gerade

abgebildet werden sollen und dergleichen mehr, was besonders für Lichtbildkammern in Betracht kommt.

72. Zur Beseitigung des Farbfehlers muß man mindestens zwei verschiedene Stoffe in einer Linse vereinigen. Die Aufgabe ist: Brechung ohne Farbenzerstreuung, Brechung ohne Bildung eines Spektrums hervorzubringen. Gelingt dies bei einem Prisma, so ist es auch für die Linsen erreicht; denn diese wirken wie Prismen (58). Wir betrachten daher zuerst Prismen.

Hat man zwei Prismen verschiedenen Stoffes, die gleichlange Spektren geben, dabei aber verschieden große Ablenkungen, so genügt es, sie mit verkehrten Kanten aneinanderzufügen, um das farbenfreie, „achromatische" Prisma zu haben; denn die Farbenzerstreuungen der gegeneinander wirkenden Prismen heben sich auf, während die Differenz der Ablenkungen übrig bleibt, Die beiden Prismen a und c in Abb. 34, aus Flint- und Kronglas, leisten dies.

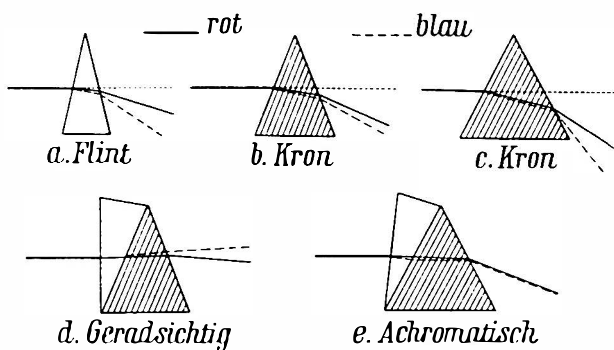


Abb. 34. Zusammengesetzte Prismen.

wie e zeigt. Wählt man den Winkel des Kronprismas kleiner, wie bei b, so wird die Ablenkung dieselbe wie beim Flintprisma a, aber die Farbenzerstreuung wird dann kleiner; daraus folgt, daß bei verkehrter Aneinanderfügung von a und b eine Differenz der Farbenzerstreuungen übrig bleibt, aber keine Brechung, wie es d zeigt. Man hat dann ein „geradsichtiges" Prisma, das ohne Ablenkung Spektren gibt, was oft erwünscht ist. Solche geradsichtigen Prismen können ganz ausgedehnte Spektren geben, wenn man die Prismenwinkel gehörig groß wählt und auch mehrere Prismen hintereinander setzt.

Es haben somit hier zwei verschiedene Aufgaben auf einmal ihre Lösung gefunden: die farblose Brechung und die geradsichtige Farbenzerstreuung. Dies war nur dadurch möglich, daß zwei Stoffe gewählt wurden, bei denen Brechung und Farbenzerstreuung nicht einander proportional sind; denn sonst würde durch Steigerung des Prismenwinkels beim schwächer brechenden Stoff (Kronglas) sowohl das Spektrum als auch die Ablenkung ebenso groß geworden sein wie beim anderen Stoff (Flintglas), und es wäre bei Gegeneinanderstellung der beiden Prismen weder Farbenzerstreuung noch Brechung übrig geblieben.

Daß es Stoffe gibt, die der angegebenen Bedingung genügen, dies zeigte sich, als man verschiedene Glassorten eingehend auf ihre Brechungsexponenten für verschiedene Farben untersucht hatte. Die Brechung wird durch den (um 1 verminderten) Brechungsexponenten einer mittleren Farbe (etwa Grün) bemessen, die Farbenzerstreuung („Dispersion") durch den

Unterschied der Brechungsexponenten zweier verschiedener Farben (etwa Rot und Indigoblau). Die Zahlen in Tab. 36 (35) zeigen, daß beispielsweise das Flintglas der 4. Zeile, verglichen mit dem Kronglas (3. Zeile) 3·3mal so starke Dispersion bei nur 1·3mal so starker mittlererBrechung hat; das Flintglas der 5. Zeile hat sogar weniger mittlere Brechung bei größerer Dispersion als das Kronglas.

Aus solchen Gläsern macht man auch „achromatische (farbfehlerfreie) Linsen, indem man — ganz entsprechend der Gegeneinanderstellung der Prismen — eine Sammellinse des einen Glases mit einer Zerstreuungslinse des anderen zusammensetzt (Abb. 35). Alle Fernrohrobjektive, Mikroskopobjektive, Lichtbildkammerlinsen sind von dieser Art[1]). Zu bemerken ist, daß mit zwei Glassorten im allgemeinen nur 2 Farben genau zum Zusammenfallen kommen, die man je nach Bedarf wählt; die anderen Farben bleiben dann in zarter Umränderung an den Bildern sichtbar, was meist wenig stört.

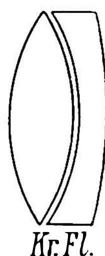


Abb. 35. Achromatische Linse.

73. Schlieren. — Alle Gläser für optische Geräte müssen schlierenfrei sein, d. h. sie müssen überall gleichen, einheitlichen Brechungsexponenten haben. „Schliere" heißt ein Gebiet abweichenden Brechungsexponentens in einem Medium. Wasser z. B. zeigt Schlieren, wenn es nicht überall gleiche Temperatur hat, weil der Brechungsexponent mit der Temperatur sich ändert (vgl. W Abb. 51). Auch Gase können Schlieren zeigen (W Abb. 56). Man entdeckt Schlieren bei gut homozentrischer Beleuchtung im einfachen Schattenbild auf einem in einiger Entfernung aufgestellten Schirm. Die Schliere erscheint so als Ort veränderter Helligkeit auf dem sonst gleichmäßig erleuchteten Schirm; sie ändert die Lichtverteilung im Schattenbild, weil sie das Licht mehr zusammen oder auseinander bricht, je nachdem ihr Brechungsexponent größer oder kleiner ist als der der Umgebung. Zur Untersuchung von Glasproben auf Schlieren müssen die Stücke mit angeschliffenen ebenen Flächen versehen sein; Flächenunebenheiten würden Schlieren vortäuschen. Mit Zuhilfenahme von Linsen kann die Schlierenbeobachtung sehr verfeinert werden.

[1]) In Okularen mit zwei Linsen (71) können Kugelfehler und Farbfehler der beiden, in geeignetem Abstand befindlichen Linsen gegeneinander wirken und dadurch einander aufheben. Manchmal läßt man in ähnlicher Weise auch das Objektiv und die erste Okularlinse zusammenwirken.

II. Atomoptik.

74. In diesem Teil der Optik behandeln wir die eigentümliche Zusammengehörigkeit von Licht und Materie, von Ätherwellen und Atomen. Diese Zusammengehörigkeit ist grundwichtig; sie ist aber auch alltäglich; sie wird merklich, so oft nach Entstehen oder nach Verschwinden von Licht gefragt wird. Alles Licht kommt von Materie; nirgends entsteht es frei im Äther. Auch weiß man nichts von einem Verschwinden von Licht im freien Äther; von den fernsten Gestirnen läuft es bis zur Erde und auch, soweit bekannt, weiter durch endlose Räume; doch von Materie kann es verschluckt, „absorbiert" werden.

Wir kommen so zur Betrachtung der Aussendung — Emission — und der Verschluckung — Absorption — des Lichts und der zugehörigen Erscheinungen des Zusammenwirkens von Licht und Materie. Dabei sollen hier vorzugsweise die sichtbaren Ätherwellen berücksichtigt werden. Eben daß wir für diese Wellen mit einem besonderen Wahrnehmungsorgan begabt sind, dies hat den Zugang auch zu aller weitergehenden Kenntnis erst eröffnet. Einiges über die kürzeren und längeren Wellen (Hochfrequenzstrahlen, Ultraviolett, Ultrarot) nehmen wir des Zusammenhangs wegen sogleich hinzu mit Hinweisen auf die besondere Behandlung an anderen Stellen[1]).

Über die Atome nehmen wir einige Kenntnisse aus der Elektrizitätslehre voraus, deren Ursprung angemerkt wird.

a) Lichtaussendung (Emission) heißer Körper.

75. Unterscheidung nach dem Aggregatzustand. — Zu den wegen hoher Temperatur leuchtenden Körpern, die wir hier untersuchen, gehören die allermeisten Lichtquellen; die Sonne und fast alle künstlichen Lichtquellen sind heiße Körper. Es gibt allerdings auch kalte Lichtquellen, die wir gesondert betrachten werden (102 u. f.). Der Zusammenhang der Lichtaussendung heißer Körper mit der Absorption und mit der Temperatur des aussendenden Körpers ist in der Wärmelehre untersucht (W 166 u. f.), und wir werden darauf zurückkommen. Hier untersuchen wir besonders die Abhängigkeit der Lichtaussendung der heißen Körper von ihrer stofflichen Beschaffenheit.

Diese Abhängigkeit kommt im festen und flüssigen Aggregatzustand wenig zur Geltung, wohl aber in charakteristischer Weise bei den Gasen. Dies entspricht dem Zusammenhang mit der Absorption nach Kirchhoffs Gesetz (W 168). Flüssige und feste Körper absorbieren besonders bei hoher Temperatur (80) fast alle Lichtwellenlängen, und daher senden sie auch fast alle Wellenlängen aus, wobei die stoffliche Beschaffenheit kaum Unterschiede gibt. Die Gase jedoch verhalten sich anders; hier kommt die stoffliche Beschaffenheit in Emission sowie

---

[1]) Die Übersicht sämtlicher Ätherwellen findet man in Abb. 39 (88).

in Absorption stark zur Geltung: es werden je nach den vorhandenen Atomen nur bestimmte Wellenlängen ausgesandt (vgl. 80).

Man kann demnach in Bezug auf Lichtemission heißer Körper für die allermeisten Fälle (vgl. 80, 81) treffend sagen: Glühende feste und flüssige Körper geben lückenlose, kontinuierliche Spektren; glühende Gase und Dämpfe geben Linienspektren (vgl. 70).

76. Leuchtende Gase. — Glühende Gase oder Dämpfe hat man in der Bunsenflamme, die — vom inneren Kegel abgesehen — an sich nur sehr schwach leuchtet, der man aber mittels hineingebrachter Platinöse leicht beliebige, verdampfbare Stoffe zuführen kann. Außerdem leuchten Gase und Dämpfe im elektrischen Funken (E 27), in elektrischen Entladungsröhren (E 439) und im elektrischen Bogen (E 219), wobei im letzteren Falle nicht die festen Kohlen zu betrachten sind, sondern der zwischen den Kohlen entstehende „Bogen" selbst, der die glühenden Dämpfe irgendwelcher auf die Kohlen gebrachten Stoffe enthält. Alle diese gasförmigen Lichtquellen geben Linienspektren, wovon Abb. 36 eine Reihe von Beispielen zeigt, die wir weiter unten eingehend betrachten.

77. Flammenspektren. — Die grundlegenden Untersuchungen sind mit der Bunsenflamme ausgeführt (Bunsen 1860). Schon bei der Alkohollampe war es aufgefallen, daß deren Flamme oft Gelbfärbung zeigte, besonders wenn gewisse Stoffe auf den Docht gebracht wurden, und daß dieses gelbe Licht monochromatisch ist. Es war aber nicht mit Sicherheit feststellbar, welchem Stoff — wenn überhaupt einem bestimmten Stoff — diese Gelbfärbung zugehört; denn man konnte sie mit allerlei Stoffen hervorbringen und die Alkohollampe war zu entscheidenden, reinen Versuchen auch wenig geeignet. Bunsen zeigte, daß die Gelbfärbung, mit der gelben Linie im Spektrum, ausschließlich dem Element Natrium zugehört; nur Natriumverbindungen, in die Flamme gebracht, bringen sie hervor, andere Stoffe — wenn sie nur genügend rein sind — nicht. Den anderen Alkalimetallen und Erdalkalimetallen gehören andere Flammenfärbungen und dementsprechend andere Linienspektren zu.

Insofern alle Verbindungen eines und desselben Metalles dasselbe Spektrum geben, muß angenommen werden, daß diese Verbindungen bei der hohen Temperatur der Flamme zersetzt werden, so daß das allen Verbindungen gemeinsame Metallatom im freien Zustand zur Lichtemission kommt. Dies ist auch durchaus bestätigt; verhältnismäßig wenige Spektren von glühenden Gasen haben sich als „Verbindungsspektren", d. i. Molekülspektren gezeigt, die dem Vorhandensein oder dem Auftreten bestimmter Moleküle bei der betreffenden Temperatur zuzuschreiben sind und die diese Moleküle als „Emissionszentren" haben. Die allermeisten Spektren von Flammen, Bogen, Funken und Entladungsrohr gehören den einzelnen Elementen, d. i. Atomen zu und haben diese als Emissionszentren. Eine sehr große Zahl von Untersuchungen hat dies allmählich gesichert.

78. Spektralanalyse. — Es ist danach sogar für jede Atomsorte, für jedes Element, nichts kennzeichnender als das ihm zugehörige, besondere Spektrum mit seinen besonderen Linien, die in ihren spektralen Lagen — d. i. Wellenlängen — mit den Linien keines anderen Elementes übereinstimmen. Darauf beruht auch Bunsens „chemische Analyse durch Spektralbeobachtungen",

die „Emissionsspektralanalyse", wobei der zu untersuchende Stoff vor dem Spalt des Spektroskopes in glühenden Gaszustand versetzt wird.

Die Empfindlichkeit dieser Analyse, besonders für Metalle, ist außerordentlich groß; so ist beispielsweise noch 1 Hundertmilliontel mgr Natrium — allein oder in chemischer Verbindung oder Gemisch — in der Bunsenflamme durch das Aufblitzen der charakteristischen gelben Natriumlinie mit Sicherheit nachweisbar. Diese vorher unerhörte Empfindlichkeit, welche auch jetzt nur von der elektrischen Nachweisung der radioaktiven Elemente (E 560) noch übertroffen wird, war auch die Ursache der anfänglich zu überwindenden Schwierigkeiten bei Begründung der hierher gehörigen Kenntnis; es bedurfte höchster Reinheit der Versuche, um beispielsweise auch nur über die Zugehörigkeit der Gelbfärbung der Flamme zum Natrium Sicherheit zu erlangen.

Eine Reihe von Entdeckungen neuer Elemente folgte diesen Erkenntnissen; Rb, Cs, Tl, In, Ga, Ge sind durch das Auftreten neuer Spektrallinien in der Bunsenflamme bzw. im Funken entdeckt worden; sie waren wegen der Geringfügigkeit bzw. Seltenheit ihres Vorkommens in den Stoffen der Erdrinde bis dahin unbemerkt geblieben. Auch in anderer Weise entdeckte Elemente, wie die „Edelgase" He, Ne, Ar, Kr, Xe, konnten nur mit Hilfe ihrer — hier mittels Entladungsrohres erhältlichen — Spektrallinien mit Sicherheit gesondert werden[1]). Ganz allgemein ist nichts beweisender für die Elementnatur irgendeines Stoffes, als daß er sein besonderes Spektrum hat, das keinem anderen Element zugehört. So wurden auch die Elemente der „seltenen Erden" mit Sicherheit voneinander gesondert. Jedem Element gehört sein Spektrum zu.

79. Eigenschwingungsdauern der Atome. — Es ist demnach auch unzweifelhaft, daß die Wellenlängen der Spektrallinien für jedes Element bestimmte Aussagen über die Beschaffenheit seiner Atome bedeuten müssen.

Jeder ausgesandten Welle kann eine entsprechende Eigenschwingungsdauer im Atom zugeschrieben werden, insofern als Wellen bestimmter Länge, Wellenzüge, stets periodische Vorgänge zum Ursprung haben (A 5). Da die Wellen des Lichtes elektromagnetisch sind (3), müssen es elektrische Eigenperioden sein, die die Atome in ihren Spektrallinien zeigen. Es ist das nicht die einzige Anzeige solcher Art; wir stoßen auch sonst immer wieder auf Erscheinungen, die die Atome als elektrische Oszillatoren, sowie auch Resonatoren, erkennen lassen (88, 90, 113). Die Atome wirken — als Aussender elektromagnetischer Wellen — ganz wie die großen elektrischen Oszillatoren (E 430), allerdings mit der Besonderheit, daß die Atome ihre Aussendung nur in bestimmten Energiebeträgen machen (W 180, 181) und daß sie das wohl meist gruppenweise tun (165).

Die Möglichkeit von elektromagnetischen Schwingungen bei Atomen ist auch fast selbstverständlich, wenn man bedenkt, daß jedes Atom eine sehr große Anhäufung von elektromagnetischer Energie ist[2]), deren Masse (E 434) sowohl

---

[1]) Helium ist übrigens zuerst durch eine dunkle Spektrallinie auf der Sonne gefunden worden (91), die keinem bis dahin bekannten Element zugehörte; später erst in irdischen Stoffen.

[2]) Das Atominnere ist durch Kathodenstrahlen untersuchbar geworden; es ist das Vorhandensein starker elektromagnetischer Felder im Atominneren unmittelbar angezeigt, und es ist durch die Abtrennung von Elektrizität aus den Atomen nachgewiesen, daß sie bewegliche Elektrizitäten enthalten (E 520).

als Ganzes als auch in Teilen schwingungsfähig sein kann und also auch Wellen ausgeben kann, wenn die Schwingungen unter Loslösung von elektromagnetischer Energie stattfinden, welchen Vorgang man bei großen elektrischen Oszillatoren gut kennt (E 421). Wie die Loslösung bei den sehr kleinen Oszillatoren, den Atomen oder Atomgruppen, sowie aus dem Atominnern (81) stattfindet, darüber fehlt noch Kenntnis, obgleich bedeutungsvolle Ansätze zu Fortschritten vorliegen (vgl. E 526).

80. Dichte Gase; flüssige und feste Körper. — Daß glühende Gase — im Gegensatz zu flüssigen und festen Körpern — die Eigenschwingungsdauern der Atome so deutlich zeigen können, wie sie in den Linienspektren beobachtet werden, ist verständlich. Denn im Gaszustand sind bei nicht zu großer Dichte die Moleküle durchschnittlich so weit voneinander getrennt, daß sie einander durch gegenseitige Kräfte nicht wesentlich stören (M 346, W 78 u. f.); zudem sind bei hoher Temperatur die Moleküle meist in ihre Atome zerfallen (W 124). Ist aber das Gas oder der Dampf einigermaßen dicht, so werden die gegenseitigen Störungen der lichtaussendenden Atome merklich. Es treten Verbreiterungen der Spektrallinien auf, entsprechend dem Hinzukommen abweichender, verkleinerter und vergrößerter Schwingungszahlen. Sehr dichte Gase (über 1 Atm. Druck) können sogar kontinuierliche Spektren geben, wie die flüssigen und festen Körper, bei welchen wegen der durch die Wärmebewegung fortdauernd wechselnden gegenseitigen Störungen der dicht benachbarten Moleküle einheitliche Schwingungsdauern überhaupt nicht mehr bestehen können, so daß das Gemisch aller Wellenlängen emittiert wird.

Dies ist die einfache Erklärung der Verschiedenheit der Lichtemission je nach dem Aggregatzustand (75). Auch versteht sich daraus, daß vollkommen schwarze Körper, die alle Wellenlängen absorbieren und aussenden, am besten im festen Aggregatzustand verwirklicht sind und zwar bei hohen Temperaturen, wo die störende Wärmebewegung am lebhaftesten ist (vgl. 86 und W 173).

81. Vor Störungen geschützte Wellenaussendungen. — Einige Stoffe geben auch im festen Aggregatzustand Linienspektren; es sind dies die Verbindungen der seltenen Erdmetalle, wie Ce, La, Ne, Pr, Sm. Es ist dies nach Bekanntem nur dahin zu verstehen, daß die Atome dieser Elemente das Licht aus ihrem Inneren emittieren und daß die Störungen der Nachbarschaft nicht oder nur wenig bis ins Innere der Atome reichen. Dies stimmt mit der Tatsache, daß Linienemission bei festen Körpern ganz allgemein beobachtet wird, sobald man zu den äußerst kurzen Wellenlängen der Hochfrequenzstrahlen übergeht (105, E 500 u. f.), die durch elektrische Mittel zur Emission gebracht werden können und von denen auch aus anderem Grunde anzunehmen ist, daß sie überhaupt nur aus dem Innersten der Atome kommen. Es sind nämlich den beiden Elektrizitäten, aus welchen alle Atome aufgebaut sich zeigen (E 520 u. f.), in den äußerst kleinen Abständen, welche im Innersten der Atome in Betracht kommen, diejenigen sehr großen Kräfte zuzuschreiben — wenn man nach den außerhalb der Atome geltenden Gesetzen urteilt (vgl. E 539) —, welche zu den sehr schnellen Schwingungen erforderlich erscheinen, die den äußerst kurzen Wellen der Hochfrequenzstrahlen zugehören. Daß die Angriffspunkte der Molekularkräfte nur im Äußeren der Atome liegen, ist auch durch die Untersuchung dieser Kräfte selbst angezeigt (M 248).

82. Spektralserien. — Als ein Weg zur Ergründung des Atominneren mit den bestimmten Eigenschwingungsdauern (79) ist das Studium der Spektren aller bekannten Elemente nach Bunsens und Kirchhoffs Vorgehen immer eingehender weiter betrieben worden. Es zeigte sich, daß die Bunsenflamme nicht alle Linien der Elemente ergibt, auch nicht derjenigen, zu deren Verdampfung sie geeignet ist, sondern daß dazu auch der elektrische Bogen und Funken, sowie für andere Elemente, wie z. B. Wasserstoff, Chlor, die Edelgase, auch das elektrische Entladungsrohr zu Hilfe genommen werden muß (vgl. 76).

Sammelt man so nach variierten Beobachtungen für jedes Element sämtliche Spektrallinien, die ihm zugehören, so erhält man im allgemeinen ein völlig unübersichtliches Liniengewirre. Es ist aber gelungen, das Gewirre in Liniengruppen aufzulösen, die nach den Umständen ihrer Aussendung zusammengehören.

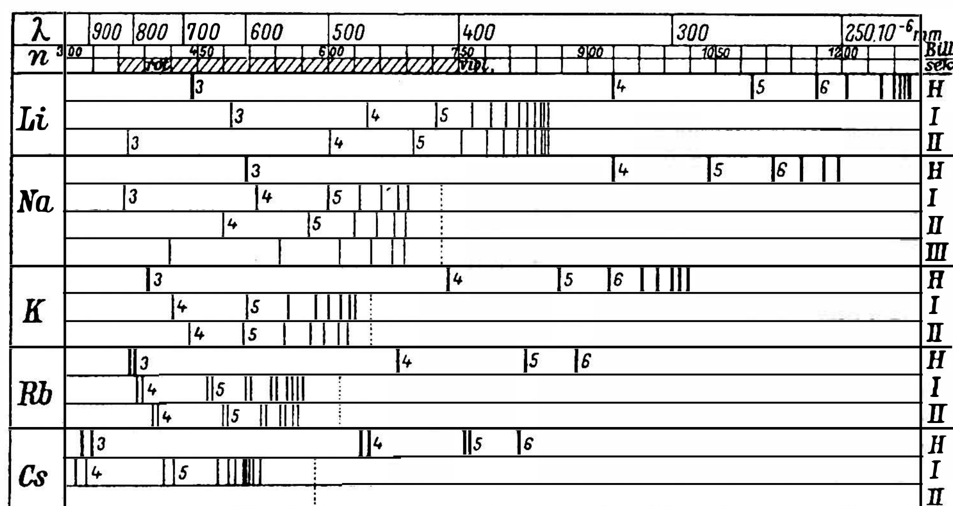


Abb. 36. Spektralserien der Alkalimetalle.

Diese Gruppen — **Serien** genannt — zeigen eine eigentümliche Linienanordnung. Trägt man die Linien nach Wellenlängen auf oder auch nach Schwingungszahlen (wie es in Abb. 36 geschehen ist), so vermindern sich die Abstände benachbarter Linien einer Serie beim Fortschreiten nach kürzeren Wellen gesetzmäßig immer mehr, bis eine Grenze erreicht wird, an der die Linien sich stark häufen und wo die Serie ihr Ende hat, die „**Serienkante**", über die hinaus keine zur Serie gehörigen Linien mehr folgen.

Abb. 36 zeigt Beispiele für die Alkalimetalle; am oberen Rand findet sich eine Skale der Wellenlängen (λ) und der Schwingungszahlen (n); das sichtbare Gebiet ist durch Schraffierung angedeutet. Die drei Serien des Lithiums sind ganz eingezeichnet; sonst ist öfter die Häufung der Linien gegen die Kante hin weggelassen, in einigen Fällen aber die Kante selbst (punktiert) angegeben.

Zu jedem Element gehören mehrere Serien, die in der Abb. 36 mit H (Hauptserie) und I, II, III (Nebenserien) bezeichnet sind. Zu bemerken ist, daß die Intensitäten der Linien jeder Serie gegen die Kante hin meist sehr abnehmen,

was übrigens den Strahlungsgesetzen der heißen Körper entspricht (W 172, 173). Außerdem zeigt sich, daß fast alle Spektrallinien mehrfach sind, so bei allen Alkalimetallen doppelt mit Abständen, die mit zunehmendem Atomgewicht stark wachsen[1]).

Im Spektrum des elektrischen Bogens kann man die Übereinanderlagerung sämtlicher Serien jedes der Alkalimetalle (Abb. 36) sehen; doch bemerkt man bei genauerer Untersuchung, daß die Hauptserie (H) von den äußersten, kältesten Teilen der Bogenflammen[2]) ausgesandt wird, während die Nebenserien I, II, III der Reihe nach von den mehr inneren, dichter bei den Kohlen liegenden Flammenschichten, die steigende Temperaturen haben, ausgehen.

Die Bunsenflamme liefert fast rein die Hauptserie der Alkalimetalle allein, wie der Saum des elektrischen Bogens, was auch ihrer Temperatur entspricht; so ist z. B. für das Flammenspektrum des Li die eine rote Linie (H, 3 in Abb. 36), für das Na die gelbe Linie (ebenfalls H, 3), für das K je eine Linie im äußersten Rot und eine im äußersten Violett (H, 3 und 4) kennzeichnend. Die anderen Hauptserienlinien liegen außerhalb des sichtbaren Gebietes. Daher hat man in der Na-, Li- auch Tl-haltigen Bunsenflamme so gute monochromatische Lichtquellen.

83. Serienformeln. — Das leichteste und kleinste Atom, das Wasserstoffatom, hat auch das einfachste Emissionsspektrum; dasselbe besteht im sichtbaren Gebiet nur aus einer Serie[3]). Abb. 37 zeigt dieselbe unter $o = 2$ zusammen

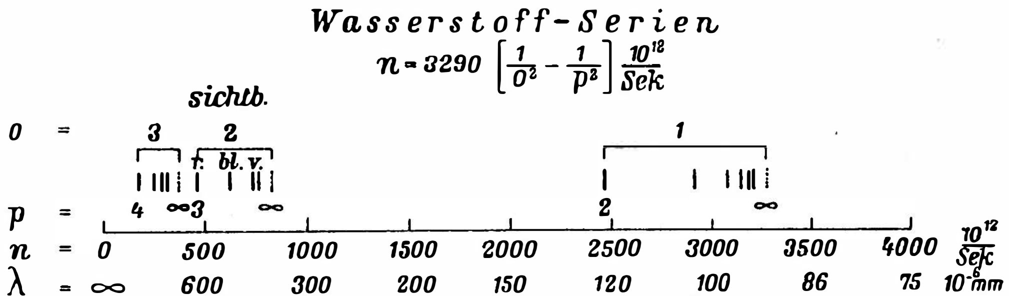


Abb. 37. Schwingungszahlen n und Wellenlängen λ der Wasserstoffserien.

mit den darunter verzeichneten Skalen der Schwingungszahlen n und der Wellenlängen λ. Die Serie besteht aus einer roten, einer blauen (blaugrünen) Linie und einer Reihe von blauvioletten und violetten Linien, die gegen die Kante hin (in der Abbildung punktiert) zunehmend schwächer werden. Außerdem ist noch eine ganz im Ultrarot und eine ganz im Ultraviolett liegende Serie vor-

[1]) In der Abb. 36 sind nur für Rb und Cs (mit den größten Atomgewichten) Doppellinien gezeichnet. Bei Na ist die Doppelheit in guten Spektroskopen mit nur einem Prisma eben sichtbar; im Maßstab der Abb. 36 verschwindet sie. Bei Li (mit dem kleinsten Atomgewicht) stehen die Linien der Paare noch viel dichter (vgl. 158).

[2]) Über die Bogenflammen siehe E 219.

[3]) Ein ebenfalls dem reinen Wasserstoff zugehörendes, aber viel linienreicheres Emissionsspektrum ist dem Wasserstoffmolekül, H_2, zuzuschreiben, das oben behandelte einfache Spektrum wohl ohne Zweifel dem Atom H. Es ist in den elektrischen Entladungsröhren immer ein Anteil einatomigen Wasserstoffs anzunehmen (vgl. E 518).

handen (in der Abbildung unter $o = 3$ und $o = 1$). Die sichtbare Wasserstoffserie hat man — weil für sich allein hervortretend und als gesetzmäßige Linienverteilung ohne weiteres auffallend — zuerst (durch Probieren) in eine Rechenformel zu fassen vermocht, die die Wellenlängen bzw. die Schwingungszahlen n aller ihrer Linien richtig angibt. Diese Formel ist (in gewisser Verallgemeinerung) in Abb. 37 oben angegeben. Man hat für die sichtbare Serie $o = 2$ einzusetzen, und es gibt dann die Formel mit $p = 3, 4, 5 \ldots\ldots$ die Schwingungszahlen aller Linien der Serie richtig an; $p = \infty$ gibt die Kante. Da bei geeigneter Wahl der Konstante der Formel ($3290 \cdot 10^{12}$/sek) die Übereinstimmung mit der Wirklichkeit so genau wurde als die Wellenlängenmessungen der Linien nur überhaupt ausführbar waren, so war nicht zu bezweifeln, daß die Formel eine bestimmte Bedeutung für das Atominnere haben müsse. Man hat dann auch für die Serien vieler anderer Atome ähnliche Formeln gefunden, denen entsprechende Bedeutung zuzuschreiben wäre. Ist auch die Bedeutung der Formeln für das Atominnere noch nicht befriedigend anzugeben, so hat man doch mit Benutzung schon vorhandener Kenntnis vom Atominneren (E 527 u. f.) und von der Art der Leuchterregung der Atome (115) Rechenverfahren im Anschluß an die Serienformeln eingerichtet. Ein Ergebnis davon ist die (in Abb. 37) bereits angegebene, verallgemeinerte Formel für das Wasserstoffatom, die (mit $o = 3$, bzw. $o = 1$) auch die beiden anderen Serien des Wasserstoffs richtig zu berechnen erlaubte. Auch ist man dadurch zur Anlegung übersichtlicher Register für viele Linien der Elemente gelangt. Wir kommen darauf und auf die Deutungen, welche man teilweise den Rechenverfahren gegeben hat, in der Elektrizitätslehre zurück (E 544).

b) Lichtabsorption.

84. Absorptionsspektren. — Wenn Licht auf einen Körper trifft, so erfährt der eindringende Teil beim Fortschreiten im Körper stets eine Schwächung seiner Intensität. Man nennt das die Absorption des Lichtes. Es werden nicht alle Wellenlängen gleichmäßig geschwächt; meist gibt es Spektralstellen vorzugsweiser, auswählender, „selektiver“ Absorption (54).

Man findet diese Stellen, soweit sie im sichtbaren Teil des Spektrums liegen, wenn man eine genügend dicke Schicht des betreffenden Körpers zwischen eine weiße Lichtquelle und den Spalt eines Spektroskopes bringt. Jede Absorptionsstelle zeigt sich dann als dunkler Streifen im Spektrum. Bei festen und flüssigen Körpern sind diese Streifen verwaschen begrenzt und oft auch sehr breit, sie werden dann auch „Absorptionsbanden“ genannt; nur bei Gasen finden sich „Absorptionslinien“, die bei genügender Verdünnung des Gases große Schärfe zeigen können. Die Banden zeigen an, daß ganze Gruppen benachbarter Wellenlängen absorbiert werden; schmale, scharfe Linien zeigen die Absorption einzelner, bestimmter Wellenlängen an.

Bei farbigen Körpern ist man auch ohne Spektroskop schon sicher, daß Absorptionen im sichtbaren Gebiet vorhanden sein müssen; doch ist mit bloßem Auge niemals ein sicherer Schluß zu ziehen (53). Ein rotfarbiger Körper z. B. wird stets mindestens das komplementäre Grün absorbieren müssen; er kann aber auch das ganze Spektrum mit Ausnahme von Rot absorbieren. Absorptionslinien oder sehr schmale Banden können dem Auge ohne Spektroskop ganz verborgen bleiben.

85. *Absorption von Wellenstrahlen* kann immer als *Folge des Mitschwingens beweglicher Teile* des absorbierenden Körpers aufgefaßt werden. Diese Teile nehmen Energie aus den Wellen in sich auf (vgl. A 83) und geben sie verschiedenartig weiter, was wir später betrachten (92). Die Energie fehlt dann im Wellenzug, der den Körper durchsetzt hat, d. h. die Intensität des Wellenzuges ist geschwächt.

Haben die beweglichen Teile des Körpers eine bestimmte Eigenschwingungsdauer, so werden sie vorzugsweise durch diejenigen Wellenlängen ins Mitschwingen gebracht, denen dieselbe Schwingungsdauer zugehört. Es ist dies der Vorgang der *Resonanz*, den wir in der Akustik schon für alle Wellen geltend eingehend betrachtet haben (A 84). Die Energieaufnahme aus der Welle ist in diesem Falle besonders stark und die betreffenden Wellenlängen werden daher vorzugsweise, auswählend, „selektiv" absorbiert. *Selektive Absorption* ist demnach deutlich *eine Resonanzerscheinung*, und dies bestätigt sich auch in Einzelheiten (88, auch E 419, 426).

86. *Störungen der Eigenschwingungen.* — Es ist nach dem über die Emission Gesagten (80) verständlich, daß die festen und flüssigen Körper Banden, die genügend verdünnten Gase Linien der Absorption zeigen; die infolge der Wärmebewegung stets wechselnden Störungen der Nachbarschaft sind es, welche in den ersteren Fällen die Eigenschwingungsdauern der resonanzfähigen Teile der Körper fortdauernd abändern, so daß die Absorption auf breite Stellen benachbarter Wellenlängen sich erstreckt. Bemerkenswert ist es, daß Verbindungen der seltenen Erden — wie bei der Emission (81) — auch bei der Absorption im festen Zustand Linienspektren geben, allerdings meist mit sehr merklicher Verwaschung.

Die Breite aller Absorptionsstreifen nimmt mit *steigender Temperatur zu*, entsprechend den zunehmenden Störungen infolge der gesteigerten Wärmebewegung. Bei genügend hohen Temperaturen nähern sich alle Körper der vollkommenen Schwärze; ihre Absorptionen verbreiten sich über das ganze sichtbare Spektrum und noch weit darüber hinaus (vgl. W 173).

87. *Absorptionsspektralanalyse.* — Welchen Teilen eines Körpers die Absorption und also die durch das Spektrum angezeigte Schwingungsfähigkeit eigen ist, dies war in vielen Fällen verhältnismäßig leicht zu ergründen. Alle Eisenoxydsalze zeigen beispielsweise in Lösung dieselbe gelbbraune Färbung und damit verbunden eine sehr breite Absorption am blauvioletten Ende des Spektrums; diese Absorption ist daher dem gemeinsamen Bestandteil dieser Lösungen, dem Ferri-Jon (E 180 u. f.) zuzuschreiben. Ebenso gehört das Blau, d. i. die Absorption der langen Wellen, bei den Kupferlösungen dem Kupri-Jon zu. Bei den vielen Farbstoffen unter den Kohlenstoffverbindungen sind es gewisse Atomgruppen in den Molekülen, denen die Absorption zugehört.

In dieser Weise hat sich auch eine chemische Analyse durch Absorptionsspektralbeobachtungen entwickelt, besonders geeignet für Farbstoffe, Blut und andere farbige Körper.

88. *Dispersionstheorie (Theorie der Farbenzerstreuung).* — Das Mitschwingen von Teilen der materiellen Medien in deren Innerem muß auch Einfluß auf die Lichtgeschwindigkeit im Medium und damit (41, 42) auf den Brechungsexponenten haben. Dieser Einfluß ist je nach der Wellenlänge des

Lichtes von vornherein verschieden zu erwarten, weil das Mitschwingen vorzugsweise bei einer bestimmten Schwingungszahl, d. i. Wellenlänge stattfindet. Dies ergibt eine bestimmte Abhängigkeit des Brechungsexponenten von der Wellenlänge des Lichtes, d. i. einen bestimmten Verlauf der Farbenzerstreuung (Dispersion) bei der Lichtbrechung im betreffenden Medium, in Zusammenhang mit dessen Absorption.

Dieser Gedanke ist durch Rechnung verfolgt. Es kommt darauf an, in die für Ätherwellen (elektromagnetische Wellen) geltenden Gleichungen (E 406)[1]) das Mitschwingen der inneren Teile des materiellen Mediums einzuführen. Diese Teile müssen, um mitschwingen zu können, elektrische Ladung haben (3, E 16, 17), und um bestimmte Schwingungsdauern zu haben, müssen sie mit bestimmten Massen versehen und durch bestimmte Kräfte an Gleichgewichtslagen gehalten sein. Nimmt man die Schwingungen der Teile gedämpft an[2]), so hat man auch die Absorption eingeführt.

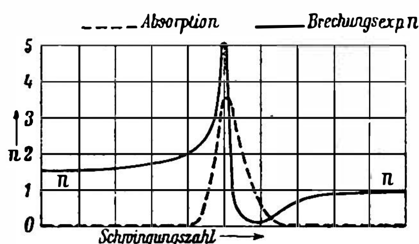


Abb. 38. Verlauf der Farbenzerstreuung (Dispersion) und Absorption an einer Resonanzstelle.

Das charakteristisch Besondere des Ergebnisses der Rechnung ist in Abb. 38 dargestellt. Die Abszissen sind Schwingungszahlen[3]), die Ordinaten der ausgezogenen Linie sind die zugehörigen Brechungsexponenten n. Die gestrichelte Linie gibt die Lichtabsorption in dem betreffenden Stoff an; man sieht, daß ein verwaschener Absorptionsstreifen angenommen ist, wie es oft vorkommt, entsprechend einer Eigenschwingungszahl der mitschwingenden Teile, die beim Gipfel der gestrichelten Linie liegt.

Man sieht aus der ausgezogenen Linie, daß — von den kleinen Schwingungszahlen, d. i. den langen Wellen (von links nach rechts also) kommend — der Brechungsexponent n gegen die Absorptionsstelle hin zu sehr hohen Werten ansteigt, kurz nach deren Überschreitung aber schnell herabsinkt und zwar sogar unter $n = 1$, um dann zuletzt, bei größten Schwingungszahlen, d. i. kürzesten Wellen den Endwert 1 zu erreichen[4]).

Dieser Lauf des Brechungsexponenten entspricht nach vielerlei Erfahrung der Wirklichkeit. Um dies zusammenfassend zu zeigen, nehmen wir sogleich Rücksicht auf alle Ätherwellen, von kleinsten (Hochfrequenzstrahlen) bis zu größten Längen (elektrische Wellen). Eine Übersicht dieser Wellen aller Längen gibt Abbildung 39[5]). Man sieht aus der Abbildung die Kleinheit des sichtbaren

---

[1]) Siehe die Gleichungen im Anhang Va und Vb der Elektrizitätslehre (Bd. IV).

[2]) Siehe die Gleichungen im Anhang Ia und Ib zur Mechanik (Bd. I).

[3]) Man bemerkt, daß lange Wellen links, kurze Wellen rechts in der Abbildung sind.

[4]) Findet das Mitschwingen ohne Absorption statt, so ist der Verlauf des Brechungsexponenten an beiden Seiten der Mitschwingungsstelle im wesentlichen derselbe, wie in der Abb. 38, nur fehlt das den höchsten mit dem tiefsten Punkt verbindende Stück der Kurve; es tritt an dessen Stelle eine vertikale Asymptote.

[5]) Entworfen von C. Ramsauer. Eine „Großoktave" ist ein Bereich von Schwingungszahlen oder Wellenlängen im Verhältnis 1 : 10 (analog der gewöhnlichen Tonhöhenoktave mit dem Verhältnis 1 : 2).

Gebietes im Verhältnis zum ganzen bekannten Wellenlängenbereich; UV bedeutet Ultraviolett (98), UR Ultrarot (W 156).

Man kann nun folgendes bemerken:

1. Das Ansteigen des Brechungsexponenten beim Fortschreiten nach den kürzeren Wellen hin (in der Abb. 38 links vom Absorptionsstreifen), anzeigend, daß Violett stärker gebrochen wird als Rot, ist der gewöhnliche Fall der farblosen Körper, die man als Prisma benutzt um das „*normale*" *Spektrum* zu entwerfen (46). Es zeigt sich dabei in der Tat, wie es Abb. 38 entspricht, daß diese Körper nach kürzeren Wellen hin, jenseits des violetten Endes des sichtbaren Spektrums (im Ultraviolett) sehr starke Lichtabsorption besitzen.

Ist die Absorption weit jenseits des Violett, so befindet man sich mit dem sichtbaren Spektrum im Gebiet des schwachen Ansteigens des Brechungsexponen-

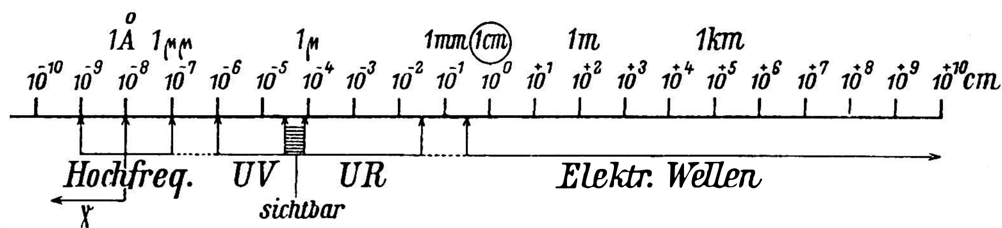


Abb. 39. Ätherwellenskale nach Großoktaven.

ten (linkes Ende der Abb. 38), d. i. bei geringer Dispersion. Dies ist z. B. bei Quarz der Fall. Schwefelkohlenstoff dagegen, mit seiner großen Dispersion (s. Tab. 36) beginnt schon im sichtbaren Violett merklich zu absorbieren (entsprechend seiner schwach gelblichen Färbung), was wieder ganz dem Laufe der Kurven in Abb. 38 entspricht.

2. Den weiteren Lauf des Brechungsexponenten, im Absorptionsstreifen selbst, kann man an Farbstoffen studieren, die einen Absorptionsstreifen im sichtbaren Gebiet haben (z. B. Fuchsin, Cyanin). Man mißt die Brechungsexponenten für verschiedene monochromatische Lichter an einem mit der Farbstofflösung gefüllten Prisma oder auch an keilförmig aufgetragenem festen Farbstoff. Es zeigt sich dabei sowohl das sehr starke Ansteigen des Brechungsexponenten bei Annäherung an den Absorptionsstreifen von der Seite der kleinen Schwingungszahlen her, als auch der noch stärkere Abfall an der anderen Seite des Streifens. Ein Prisma aus solchem Stoff entwirft ein „anomal" aussehendes Spektrum; denn es bricht die langen Wellen stärker als die kurzen, lenkt also z. B. Rot mehr ab als Violett. Man nennt das die „*anomale Dispersion*"; sie ist, ganz entsprechend Abb. 38, stets mit starker Absorption im Beobachtungsgebiet verbunden; sie ist nur deshalb nichts Gewöhnliches, weil man zur Entwerfung von Spektren selbstverständlich für alle zu beobachtenden Lichter gut durchlässige Prismenstoffe wählt.

3. Nahe beim Absorptionsstreifen gibt Abb. 38 die allerhöchsten Werte des Brechungsexponenten an. Zu diesen gehört aber auch die stärkste Reflexion der betreffenden Wellen (37), und dies zeigt sich auch stets auffällig durch den „*Metallglanz*" aller stark absorbierenden Stoffe. Dieselben reflektieren vorzugsweise, selektiv, diejenigen Wellen, welche sie auch stark absorbieren. Z. B.

zeigt das feste Fuchsin, welches (seiner roten Farbe entsprechend) Grün selektiv absorbiert, auch grünen Metallglanz. Auch die Metalle selbst sind stark lichtabsorbierende (undurchsichtige) Körper; daher auch ihre starke Lichtreflexion (vgl. 55).

4. Von den höchsten Werten sinkt dann der Brechungsexponent gegen die kurzen Wellen hin zu Werten unter 1 herab, die bei Metallen an entsprechend dünnen Prismen auch gemessen worden sind. Es bedeutet das Brechung vom Lot im betreffenden Medium, das sich damit für diese Wellen „optisch dünner" zeigt als sogar der freie Äther. Es ist dann die Laufgeschwindigkeit dieser Wellen im Medium größer als die Lichtgeschwindigkeit c. Allerdings kann diese Überlichtgeschwindigkeit stets nur auf kurzen Strecken bestehen; denn sie ist notwendigerweise mit Absorption verknüpft.

5. Der Endwert 1 des Brechungsexponenten, d. i. das Fehlen von Brechung bei höchsten Schwingungszahlen, kürzesten Ätherwellen, ist bestätigt durch das Verhalten der Hochfrequenzstrahlen, die alle Stoffe in sehr nahe unveränderter Richtung durchdringen (E 499 u. f.).

6. Der Endwert des Brechungsexponenten für langsamste Schwingungen, d. i. längste Ätherwellen (im Beispielsfall der Abbildung n = 1·5), ist gegeben durch die Quadratwurzel aus der Dielektrizitätskonstante des Mediums. Dies ist einer der Ausgangspunkte der erläuterten Rechnung und war von vornherein sichergestellt (E 429).

Alle diese Übereinstimmungen mit der Wirklichkeit zeigen sehr eingehend, daß die der Berechnung zugrunde liegende Annahme, daß elektrisch mitschwingende Teile des Mediums, die beim Mitschwingen Energie aus der Ätherwelle aufnehmen und sie weitergeben, die Absorption bewirken, der Wirklichkeit entspricht. Dazu sind auch die mitschwingenden Teile in vielen Fällen gut ausfindig gemacht; sie sind bei den längeren Wellen (Ultrarot und sichtbar) ganze, elektrisch geladene Atome oder Atomgruppen (vgl. 87); bei den kürzeren Wellen (sichtbar und Ultraviolett) sind es unzweifelhaft Teile der die Absorption besorgenden Atome, die als elektrische Resonatoren wirken. Beispielsweise müssen im Natriumdampf, der selektiv monochromatisch (gelb) absorbiert (89), und der einatomig ist (W 114), wohl die Atome die Absorption besorgen; aber sie können nicht als Ganzes schwingen, weil sie im Dampf an keine Gleichgewichtslage gebunden sind; es müssen also innere Teile der Atome die Schwingungsdauern dieses Gelb zu eigen haben. Es ist dazu bemerkenswert, daß bei der Lichtbrechung in Natriumdampf in der Tat anomale Dispersion eingehend beobachtet worden ist, wie es dem Mitschwingen von Massen entspricht.

89. Zusammenhang der Absorption mit der Emission. — Dieser Zusammenhang ist für Temperaturstrahlung (W 170, 714) fest begründet aus allgemeinster Erfahrung durch Kirchhoffs Gesetz (W 168). Danach sind Emission und Absorption, verglichen bei gleicher Temperatur und gleicher Wellenlänge, stets einander proportional.

Die auffallendsten Beispiele solcher Übereinstimmung von Emission und Absorption sichtbaren Lichtes liefern die heißen Metalldämpfe mit ihren Linienspektren (76, 82). Die Absorptionsspektren (84) dieser Dämpfe zeigen dieselben Linien dunkel, welche in den Emissionsspektren hell sind. Beispielsweise erhält

man im kontinuierlichen Spektrum einer weißen Lichtquelle eine dunkle Linie im Gelb, wenn das Licht durch Natriumdampf gegangen ist, und die spektrale Lage dieser dunklen Linie stimmt vollkommen überein mit der der hellen gelben Emissionslinie des Natriumdampfes in der Bunsenflamme oder auch im elektrischen Bogen oder Funken. Bei genügender Dispersion des benutzten Spektralapparates sieht man auch, daß die dunkle Linie doppelt ist, so wie die helle Linie.

90. Atome als Oszillatoren und Resonatoren. — Kirchhoffs Gesetz mit der Übereinstimmung der Eigenschwingungsdauern der Emission und der Absorption ist für die Atome wieder eine Anzeige dahin, daß sie als Oszillatoren wirken, die auch Resonatoren sein können (vgl. W 166, 167). Als Oszillatoren sahen wir sie schon bei der Emission wirken (79), und die in viel Einzelheiten gehenden Zeichen ihres Wirkens als Resonatoren bei der Absorption (85) haben wir ebenfalls betrachtet (88). Dabei ist auch noch bemerkenswert, daß die Störungen, welchen die Atomschwingungen von seiten der Umgebung unterworfen sind, bei Emission und bei Absorption in gleicher Weise sich zeigten, wobei sogar Zeichen für die Lagen der Oszillatoren in den Atomen in bestimmten Fällen sich ergaben (81, 86). Im Einfluß der Dielektrizitätskonstante der Umgebung zeigen sich die Lichtabsorptionszentren der Phosphore sogar deutlich als Resonatoren elektrischer Art (113).

Daß es noch nicht gelungen ist, die durch gute Erfahrung so ausgiebig angezeigten elektrischen Eigenschwingungsfähigkeiten des Atominneren im einzelnen aus sonstiger Kenntnis der Atome verständlich zu machen (vgl. 79, E 545), dies darf als Zeichen der trotz allem Erreichten (E 527 u. f.) noch immer großen Unkenntnis des Atominneren gedeutet werden (vgl. 83, E 526).

91. Spektralanalyse der Gestirne. — Unter den auf sichtbares Licht bezüglichen Anwendungen von Kirchhoffs Gesetz ist von überragender Wichtigkeit die von Bunsen und Kirchhoff selbst schon zur Ausführung gebrachte chemische Analyse der Sonne, wonach auch die anderen Leuchtgestirne untersuchbar wurden.

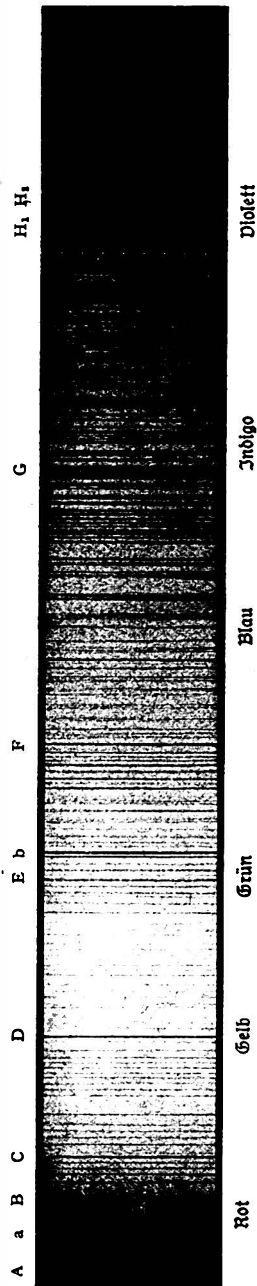


Abb. 40. Fraunhofers Sonnenlinien nach seinem Kupferstich.

Fraunhofer, der zuerst die zur Hervorbringung eines reinen Spektrums (50) erforderlichen Hilfsmittel und Bedingungen in Vollkommenheit verwirklichte, hatte (1817) gefunden, daß das Spektrum des Sonnenlichtes eine große Anzahl dunkler Linien aufweist — seither Fraunhofers Linien genannt —, wie es

Abb. 40 mit den von Fraunhofer gewählten Buchstabenbezeichnungen zeigt. Diese Linien sind durchaus dem Sonnenlichte eigen, Fraunhofer fand sie dementsprechend auch im Spektrum des Lichtes der Venus; Fixsterne, deren er einige untersuchte, zeigten ebenfalls Linien, aber in anderer Gruppierung.

Diese Linien blieben unverstanden, bis Kirchhoff und Bunsen sie als Absorptionslinien bestimmter Stoffe nachweisen konnten, da sie mit deren Emissionslinien übereinstimmten. So fällt die von Fraunhofer mit D bezeichnete Linie (Abb. 40) im Gelb zusammen mit der gelben Emissionslinie des Natriums, und sie ist auch doppelt wie diese (82); die Linien C und F fallen zusammen mit der roten und der blaugrünen Wasserstofflinie (83); E ist eine Linie des Eisens, ebenso wie 600 andere der dunklen Linien, die mit ebensovielen hellen Linien im Funkenspektrum des Eisens zusammenfallen, die Kirchhoff ausgemessen hatte; b ist eine Dreifachlinie des Magnesiums; die beiden starken schwarzen Linien H im Violett gehören dem Kalzium an. In dieser Weise zeigte sich eine ganz überwiegende Zahl von Fraunhofers dunklen Sonnenlinien in Übereinstimmung mit Emissionslinien der bekannten Elemente, und es war nach Kirchhoffs Gesetz zu schließen, daß diese dunklen Linien durch Absorption ursprünglich lückenlos weißen Sonnenlichts in Dämpfen der betreffenden Elemente auf dem Wege von der Sonne zur Erde entstehen. Da die anderen Leuchtgestirne andere Spektren zeigen, waren die absorbierenden Stoffe auf der Sonne und den Gestirnen selbst zu suchen, und es war damit zweierlei erkannt. Erstens die Beschaffenheit der Sonne: Ein fester oder flüssiger oder auch sehr dicht gasförmiger, glühender, für sich ein kontinuierliches Spektrum ergebender Kern, umgeben von einer weniger heißen und daher mehr absorbierenden als emittierenden Dampfhülle. Zweitens war gleichzeitig die chemische Zusammensetzung dieser Dampfhülle in der Hauptsache festgestellt und im einzelnen noch weiter ermittelbar gemacht.

Ebenso wurden aber auch die anderen Gestirne untersuchbar, indem nach Fraunhofers Vorgang das Spektroskop an das Fernrohr gefügt wurde. Die meisten Fixsterne zeigten sich in der Hauptsache der Sonne ähnlich; ihre dunklen Linien gehören Stoffen zu, die auch auf der Sonne gefunden wurden, nur in verschieden starkem Hervortreten. Daß auch die Temperaturen verschieden sind, wurde später ebenfalls mit Hilfe des Spektrums ergründet (W 188).

Kleine Verschiedenheiten in den spektralen Lagen der Gestirnslinien gegenüber den in irdischen Lichtquellen gemessenen Linien konnten im Sinne von Dopplers Prinzip (A 92) als Folge von Bewegung des Gestirns, bzw. der Erde in der Gesichtslinie gedeutet werden, und es gab damit das Spektroskop auch ein Mittel, diese vorher ganz unkontrollierbaren Bewegungen in Betracht zu ziehen.

Viele dem Milchstraßensystem angehörende Nebelflecke, wie z. B. der Orionnebel, zeigen helle Linien im Spektrum; sie sind damit als leuchtende Gasmassen von ungeheurer Ausdehnung erkannt.

Ist auch der Ursprung mancher an Gestirnen beobachteten Spektrallinien noch nicht gesichert, so hat man doch schon das große Hauptergebnis, das die gesamte materielle Welt, überall bis zu den Fernen, aus denen das Licht erst nach Jahrtausenden herkommt, Atome aufweist, die wir auch hier auf Erden haben. Die so gewonnene Feststellung umfassender Einheitlichkeit im

Weltganzen — den Stoffen nach, wie in den Bewegungsgesetzen (M 205—245) — ist eine der selten kommenden großen Erweiterungen des Naturerkennens.

c) Verbleib der Energie absorbierten Lichtes (Wirkungen absorbierten Lichtes).

92. Wenn Licht durch Materie geht, sind die Moleküle des durchstrahlten Körpers stets an den Schwingungen der Ätherwellen beteiligt (85, 88, 90, E 16, 17). Positive und negative Elektrizität in den Atomen erfahren stets gleichzeitig einander entgegengesetzt gerichtete Kräfte, wenn die elektrische Welle sie trifft (3); die einfachste, nach Bekanntem mögliche Folge davon ist, daß sie mit ihren eigenen und den anderen, etwa mit ihnen verbundenen Massen abwechselnd von- und zueinander schwingen[1]), und hierin — oder in einer dementsprechenden, später noch zu ergründenden verwickelteren Elektrizitätsbewegung — besteht das Mitschwingen der Materie mit dem Licht. Die mitschwingenden Teile nehmen dabei Energie aus dem Lichtwellenzug auf. Es kann vorkommen, daß diese Energie vollständig wieder an den Wellenzug zurückgegeben wird; es fehlt diesem dann nach Durchsetzung des Körpers keine Energie, und es findet also keine Absorption statt. In diesem Falle ist nur die Lichtgeschwindigkeit im Körper geändert, und diese, sowie andere Folgen des Mitschwingens haben wir bereits näher betrachtet (88).

Wenn die mitschwingenden Teile die aufgenommene Energie nicht vollständig an den Lichtwellenzug zurückgeben, sondern sie anderweitig verbreiten, so hat man den Fall der Absorption, und es tritt die Frage nach dem Verbleib der in den Lichtwellen fehlenden Energie auf. Die Menge dieser Energie ist besonders groß im Falle der Resonanz — Übereinstimmung der Eigenschwingungsdauern von Wellenzug und Körperteilen —, weil dann überhaupt viel Energie in die mitschwingenden Teile übergeht.

Man kann nach dem Endergebnis drei Fälle des Verbleibs der absorbierten Energie unterscheiden:

1. Die Energie wird von den schwingenden Teilen an ihre Umgebung weitergegeben; sie geht in die Wärmebewegung des absorbierten Körpers über. Die absorbierte Lichtenergie erscheint somit in der Form von Wärme im Körper: Wärmewirkungen des Lichtes.

2. Die Energie bewirkt Auseinandertrennung oder Lockerung der entgegengesetzt elektrischen, also entgegengesetzt bewegten mitschwingenden Teile; sie erscheint dann, falls die auseinandergetrennten Teile ganze Atome oder Atomgruppen sind, als chemische Energie (W 126): Chemische Wirkungen des Lichtes.

3. Es kann auch Abtrennung oder Verschiebung nicht ganzer Atome sondern nur der Elektrizitäten in den Atomen stattfinden, und zwar ist es die stets leichter bewegliche negative Elektrizität, welche in Gestalt von Elektronen, den Elementarquanten der negativen Elektrizität (E 458), abgetrennt gefunden wird oder als verschoben anzunehmen ist. Die aus dem Lichtwellenzug verschwundene

---

[1]) In kristallisierten Körpern sind im allgemeinen bestimmte, bevorzugte Schwingungsrichtungen vorhanden, nach denen sich Schwingungskomponenten ausbilden (vgl. 187).

Energie erscheint dann nicht in neuer Form, sondern wieder als elektrische Energie, was in zweierlei Weise merklich wird:

3a. Findet vollständige Abtrennung der negativen Elektrizität statt, so daß freie Elektronen auftreten, so wird die Erscheinung lichtelektrische Wirkung genannt; sie ist mit elektrischen Hilfsmitteln zu verfolgen und wird deshalb in der Elektrizitätslehre behandelt (E 465 u. f.).

3b. Es kann aber auch Lichtaussendung dabei auftreten, so daß die verschwundene Lichtenergie wieder als Licht erscheint: Fluoreszenz und Phosphoreszenz.

Daß chemische Wirkung des Lichtes und Fluoreszenz in der Tat durch die elektrischen Kräfte der Lichtquellen bewirkt werden, dies war auch unmittelbar nachweisbar (E 431).

Die Wärmewirkungen betreffend (93) können wir weitgehend auf die Wärmelehre verweisen; chemische Wirkungen untersuchen wir eingehend im weiter folgenden (94 u. f.); Fluoreszenz und Phosphoreszenz finden sich gesondert als „kaltes Leuchten" behandelt (102 u. f., 108 u. f.).

Allgemein ist zu sagen, daß alle diese Fälle, welche Energieaustausch durch Vermittlung von Atomen darstellen, mehr oder weniger das quantenhafte Arbeiten der Atome bei solchem Austausch merklich machen, welches zuerst bei der Untersuchung der Gesetze der Wärmeausstrahlung erkennbar wurde (W 181). Wir werden dies bei den hier zu betrachtenden Vorgängen insoweit besonders hervorheben als bereits gut gesicherte Zusammenhänge vorliegen (106, 112, 116).

Wärmewirkungen des Lichtes.

93. Es ist der gewöhnliche Fall, daß die Energie absorbierten Lichtes als Wärme im absorbierenden Körper erscheint. Sonnenlicht wärmt die Körper und zwar dunkle, stark absorbierende mehr als helle, wenig absorbierende. Atmosphärische Luft, die sichtbares Licht nicht absorbiert, wird von demselben auch nicht erwärmt; dagegen wird die absorbierende Erdoberfläche vom Sonnenlicht erwärmt und von dieser erst die Luft (W 162).

Hat man einen vollkommen absorbierenden (schwarzen) Körper und fehlen bei ihm die oben unter 2 und 3 angegebenen Wirkungen, was meist gut zu verwirklichen ist, so hat man in der Wärmemenge, die in der Zeiteinheit in der senkrecht bestrahlten Flächeneinheit auftritt, ein richtiges Maß für die Intensität des Lichtes (16). In dieser Weise können leicht die Intensitäten verschiedenfarbiger Lichter einwandfrei miteinander verglichen werden, was durch Photometrie mit dem Auge nicht möglich ist (18). Ein berußtes Thermometer, Thermoelement oder Bolometer (E 169, 226) ist geeignet zu solchen Messungen. Es ist dann auch gleichgültig, ob die zu messende Strahlung sichtbar oder unsichtbar ist. Für das unsichtbare Ultrarot ist diese Messung mittels der Wärmewirkung sogar der Hauptweg des Studiums; so wurde das Ultrarot auch entdeckt und in jeder Hinsicht weiter untersucht, worauf wir bereits in der Wärmelehre ausführlich eingegangen sind (W 150 u. f.).

Chemische Wirkungen des Lichtes.

94. Eines der ältest bekannten Beispiele ist das Bleichen farbiger Stoffe am Sonnenlicht. Jedes farbige Molekül absorbiert sichtbares Licht (54), und ist

es der Zersetzung zugänglich, was im allgemeinen um so eher zutrifft je mehr Atome es enthält, so kann es in der bereits erläuterten Weise (92) zum Zerfall oder zu einer inneren Umgruppierung kommen. Sind die dabei entstandenen neuen Moleküle farblos, absorbieren sie nicht mehr, so sind sie auch der weiteren Einwirkung des Lichtes entzogen.

95. Eine für das Leben der Pflanzen sowie der Tiere und für viele wesentliche Energieleistungen auf Erden höchst wichtige chemische Wirkung des Sonnenlichtes wird durch den grünen Farbstoff der Pflanzenblätter, das „Blattgrün" (Chlorophyll), vermittelt. Dieser Farbstoff hat starke Absorptionsstreifen, besonders im Rot, und die Energie des absorbierten Lichtes kommt in den grünen, sonnenbeleuchteten Pflanzenblättern als chemische Energie zum Vorschein: es wird die von den Blättern aus der Luft aufgenommene Kohlensäure in ihre Bestandteile, Kohlenstoff und Sauerstoff, zertrennt. Es ist dies die Umkehrung des Vorgangs der Verbrennung von Kohlenstoff zu Kohlensäure, wobei chemische Energie verschwindet; hier entsteht chemische Energie aus der verschwindenden Energie des absorbierten Lichtes.

Den so vom Sauerstoff abgetrennten Kohlenstoff behält die Pflanze für sich zum weiteren Aufbau ihres Körpers; den Sauerstoff haucht sie in die Luft aus. So wird immer wieder von neuem Sauerstoff den Tieren zu ihrer Atmung, sowie den Verbrennungsvorgängen zur Verfügung gestellt, die ihrerseits immer wieder die für die Pflanzen nötige Kohlensäure liefern. Ein für das Erdenleben wichtiger Kreislauf des Sauerstoffs der Luft liegt hier vor.

Welches die im lichtabsorbierenden Chlorophyllmolekül und den mit ihm zusammengruppierten Molekülen vor sich gehenden Umsetzungen im einzelnen sind (vgl. 96), ist Nebensache für die Erfassung der großen Energievorgänge. Es wird fortdauernd, jeweils auf der Sommerhalbkugel der Erde, Energie des Sonnenlichtes mittels der grünen Teile der Pflanzen gesammelt, die nicht — wie die sonst absorbierte Strahlungsenergie — Wärme wird, sondern in der viel verwandlungsfähigeren, auch der Aufbewahrung zugänglichen Form der chemischen Energie erscheint. Ein Teil dieser Energie geht den Tieren und den Menschen in Gestalt der Nahrungsmittel zu (W 133), die alle entweder unmittelbar dem Pflanzenreich oder den Leibern anderer Tiere und damit in letzter Linie doch den Pflanzen entnommen werden. Es ist danach nur vom Sonnenlicht genommene Energie, die der Lebenstätigkeit der Tierwelt zur Verfügung steht. Ein anderer Teil der von den Pflanzen gespeicherten Sonnenenergie ist in den Feuerungsmitteln, Holz und Kohle, zur Wärmelieferung für häusliche und technische Zwecke verfügbar. Alle kohlegeheizten Dampfmaschinen und mit sonstigen Triebstoffen gespeisten Wärmemotoren arbeiten mit der zur Steinkohlenzeit von der damals besonders üppigen Pflanzenvegetation aufgenommenen Energie des Sonnenlichts (vgl. W 164). Man sieht hier die Wichtigkeit der zeitlich fast unbegrenzten Speicherungsfähigkeit der chemischen Energie, wie sie in den Kohlelagern und Kohlenwasserstoffvorräten des Erdinneren (zusammen mit dem Sauerstoffvorrat in der Atmosphäre) vorliegt.

Es mag zur Zeit der Steinkohlenperiode die Erdatmosphäre viel reicher an Kohlensäure gewesen sein als jetzt. Mit dem gegenwärtigen, geringen Kohlesäuregehalt der Luft leben die Pflanzen nur sozusagen von der Hand in den

Mund; sie sind darauf angewiesen, daß atmende Tiere und die Verbrennungsvorgänge ihnen die notwendige Kohlensäure ohne Verzögerung nachliefern.

96. Das besonders Bemerkenswerte bei der chemischen Lichtwirkung am Chlorophyll ist, daß die chemische Wirkung, nämlich die Abtrennung des Sauerstoffs der Kohlensäure, anderswo stattfindet als die Lichtabsorption. Letztere wird durch diejenigen Teile des Chlorophyllmoleküls bewirkt, welche die Eigenschwingungsdauern der Absorptionsbanden besitzen. Die Kohlensäure, deren Sauerstoff abgetrennt wird, absorbiert selber das wirksame Licht nicht; sie kann ihm also auch keine Energie entziehen und daher von ihm auch nicht zersetzt werden. Es ist aber anzunehmen, daß die aus der Luft aufgenommene Kohlensäure im Chlorophyllmolekül irgendwie lose gebunden wird, und es ist ein auch sonst vorkommender Fall (97, 119), daß die an einer Stelle eines Moleküls aufgenommene Energie nicht an dieser Stelle, sondern nach Übertragung an einer anderen Stelle des Moleküls ihre Wirkung — in diesem Fall chemische Wirkung — ausübt. Die dabei stattfindenden Umgruppierungen der Atome des kohlensäurehaltigen Chlorophyllmoleküls sind Gegenstand fortgesetzter Untersuchungen.

97. Als ein weiteres, schon altbekanntes Beispiel chemischer Lichtwirkung sei die Schwärzung der Silbersalze am Licht erwähnt. Die Schwärze besteht aus feinzerteiltem, ausgeschiedenem Silber (Scheele 1777); der Vorgang ist also wieder Zersetzung. Die Lichtbildnerei (Photographie) ist eine weitgehende Anwendung dieser Lichtwirkung. Hier ist besonders das kurzwellige Licht wirksam, wie es auch nicht anders sein kann, da nur dieses absorbiert wird. Bromsilber und Jodsilber, die am meisten benutzt werden, sind gelblich, absorbieren also Blau und Violett, und dies sind also die wirksamsten Farben; Rot und Gelb, die vom Silberhaloid nicht absorbiert werden, lassen dasselbe unverändert.

Man kann aber auch diese Farben photographierbar machen, wenn man dem Silberhaloid geeignete Absorptionsmittel dieser Farben zufügt, die vom Haloid lose gebunden werden. Es tritt dann auch hier, wie bereits beim Chlorophyll erläutert (96), der Fall ein, daß die Lichtabsorption an der einen, die chemische Wirkung aber mittels Energieübertragung an einer anderen Stelle des Gesamtmoleküls stattfindet. Man kann so fast jede beliebige spektrale Empfindlichkeitsverteilung photographischer Schichten erreichen („Sensibilisierung"; „ortochromatische", „panchromatische" usw. Abbildung).

Wichtig war auch der Fund, daß begonnene chemische Lichtwirkung auf das Silberhaloid durch rein chemische Mittel fortgesetzt werden kann („Hervorrufung", „Entwickelung" der Lichtbilder). Das Licht bewirkt bei kurzer Einwirkung nur eine irgendwie geartete Lockerung der Moleküle[1]), die nachträglich durch chemische Mittel (Reduktionsmittel) zur völligen Zersetzung (Silberabscheidung) gesteigert werden kann. Der unsichtbar vorhandene Zustand der Lockerung (photochemischen Induktion) bleibt in der photographischen Schicht sehr lange unverändert erhalten; bei Lichtwirkung auf flüssige oder gasförmige Körper war dagegen solche Dauerwirkung nicht feststellbar.

Wesentlich für die große Lichtempfindlichkeit der photographischen Schichten

---

[1]) Man kann mit Benutzung eines von Bunsen eingeführten (ursprünglich in anderem Sinne gebrauchten) Ausdrucks sagen: Die Moleküle werden „photochemisch induziert".

ist ein geeigneter molekularer Zustand des Silberhaloids sowie auch die Gegenwart von Stoffen, die leicht haloidbindend wirken (Gelatine, Kollodium usw.) und daher die Zersetzung oder Lockerung der Moleküle befördern.

Daß die chemische Wirkung den elektrischen Kräften des Lichtes zugehört, wie bereits erörtert (92), dies wurde besonders bei der Wirkung auf Silberhaloid eingehend nachgewiesen (E 431).

98. Ultraviolett. — Die Untersuchung der chemischen Lichtwirkung auf Silberhaloid in reinem Sonnenspektrum brachte auch die Entdeckung des Ultraviolett; es zeigte sich, daß die im Violett starke Schwärzung auch noch wesentlich über die violette Grenze des sichtbaren Spektrums hinausgeht (Ritter 1802). Die dort hinfallenden, sehr brechbaren, für das Auge unsichtbaren Strahlen zeigten sich — in derselben Weise wie das sichtbare Licht, nur mit Anwendung der photographischen Platte an Stelle des Auges untersucht (152) — als Ätherwellen, die kürzer sind als die des Violett.

Die Ausdehnung des ultravioletten Teiles des Spektrums ist bei geeigneter Lichtquelle sehr beträchtlich (vgl. Abb. 39, UV); man unterscheidet daher zweckmäßig verschiedene Gebiete des Ultraviolett, die verschiedene Eigenschaften haben, und bezeichnet sie mit besonderen Namen, entsprechend den Farbennamen der verschiedenen Teile des sichtbaren Spektrums. Tab. 38 gibt eine Übersicht hierzu, in welcher auch das sichtbare blaue und violette Spektralende mit aufgenommen ist.

Tab. 38. **Die Ultraviolettgebiete.**

Wellenlänge 10^{-6} mm		Bezeichnung	Eigenschaften und Quellen
500—440		Blau	Sichtbar
440—380	Infraquarzviolett	Violett	Sichtbar
380—340		Glasviolett	Kohlebogen
340—300		Jenaglasviolett	Letzter Teil der an der Erdoberfläche in Meereshöhe noch merklichen Sonnenstrahlung
300—220		Quarzglasviolett	Hautentzünd. (Gletscherbrand) gebend[1]); Ozon bildend. Von Quarzquecksilber- und Quarzamalgamlampen (219)
220—180		Quarzkristallviolett	
180—120	Transquarz-Violett	Flußspatviolett	Schon von kurzen Luftstrecken völlig absorbiert; starke Luftleitfähigkeit ergebend (E 507)
120—30		Reflexviolett	Stark metallisch reflektiert von festen Medien
Noch kürzere Wellen		Transreflexviolett	

Das „Glasultraviolett" oder abgekürzt „Glasviolett" ist fast stets im Spektrum vorhanden, wenn es intensives Violett hat, so beim Licht des Kohlebogens (hier mehr von der leuchtenden Luft im Bogen ausgehend als von den Kohlen) und auch der Sonne. Kürzerwelliges Ultraviolett

[1]) Bräunung der Haut tritt schon bei längeren Wellen, im Jenaglasviolett und Glasviolett auf, sogar bis zur Wellenlänge 420 hin.

(„Transglasviolett" zu nennen) kann mit den gebräuchlichen Glasapparaten nicht beobachtet werden, weil es vom gewöhnlichen Glase absorbiert wird. Ein besonderes (in Jena hergestelltes) Glas läßt noch einen weiteren Teil des Spektrums durch („Jenaglasviolett").

Für noch kürzere Wellen müssen Quarzapparate benutzt werden. Quarzglas (geschmolzener Quarz) läßt etwas weniger durch als Quarzkristall. So kurze Wellen („Quarzglasviolett", „Quarzkristallviolett") sind zwar im Sonnenlicht (6000°abs., W Tab. 27) noch ganz merklich vorhanden (vgl. die Strahlung des schwarzen Körpers von 5000°abs., W Abb. 77), sie gelangen aber nicht bis zur Erdoberfläche herab; die Luft beginnt hier in dicken Schichten schon merklich zu absorbieren. Die Hautentzündung, welche auf hohen Bergen als Wirkung der Sonnenstrahlung eintritt, gehört hauptsächlich den Wellenlängen in der Nähe von 298 $\mu\mu$ zu, die in Bräunung übergehende Rötung den längeren Wellen um 385 $\mu\mu$. Beste Quellen des Quarzviolett sind die leuchtenden Metalldämpfe (vgl. die Metallspektren, Abb. 36), wie der elektrische Bogen zwischen metallhaltigen oder aus Metall (Eisen, Quecksilber) bestehenden Elektroden sie bietet (vgl. E 219). Die Eisenlampe mit wassergekühlten Eisenelektroden und die Quecksilber- oder Amalgamlampe, die beiden letzteren in Quarzverschluß, sind hier vorteilhaft.

Das noch kürzerwellige „Transquarzviolett" kann in Luft nicht mehr untersucht werden; denn schon kurze Luftstrecken sind undurchlässig für dasselbe. Man muß ausgepumpte Apparate verwenden („Vakuumspektrographen"); zu Prismen und Linsen kann Flußspat dienen, der hier weit durchlässiger ist als Luft. Die gewöhnliche photographische Schicht ist wegen der Undurchlässigkeit ihrer Gelatine unbrauchbar; es sind besonders hergestellte Silberhaloidschichten zu benutzen. Quelle dieses „Flußspatviolett" sind elektrische Entladungen in verdünnten Gasen (die stärkste, längstwellige Linie der ultravioletten Serie des Wasserstoffs liegt in diesem Gebiet; vgl. Abb. 37). Für das nächstfolgende Gebiet noch kürzerer Wellen sind keine durchlässigen festen Körper bekannt. Die starke Absorption ist aber auch hier mit metallischer Reflexion verknüpft (88; „Reflexviolett"). Dies gibt die Möglichkeit, das Reflexionsgitter (157) im Vakuum zur spektralen Zerlegung zu benutzen. In diesem Gebiet liegt die Kante der kurzwelligen Wasserstoffserie (siehe Abb. 37). Die Untersuchung des in der Tab. 38 zu unterst folgenden Gebietes noch kürzerer Wellen („Transreflexviolett") macht insofern Schwierigkeit, als hier die geritzten Gitter leicht zu grob, die Kristallgitter (160) aber zu fein werden im Verhältnis zur Wellenlänge, um gute spektrale Zerlegung zu geben. Es ist dies die in der Wellenskale Abb. 39 ersichtliche, schon in Ausfüllung begriffene Lücke zwischen dem Ultraviolett (UV), dessen Gebiete wir soeben betrachtet haben, und den noch kürzerwelligen „Hochfrequenzstrahlen", die man auch Ultra-ultraviolett nennen könnte und zu deren spektraler Zerlegung die Kristallgitter geeignet sind. Sie gehen in keiner merklichen Menge von den gewöhnlichen Lichtquellen, den heißen Körpern aus, sondern sind mittels Auftreffens von Kathodenstrahlen auf Materie zu erzeugen, worauf wir in der Elektrizitätslehre eingehen (E 499).

99. Als ein weiteres Beispiel chemischer Lichtwirkung sei die Salzsäurebildung aus Chlor und Wasserstoff genannt. Ein Gemisch gleicher Volume dieser beiden Gase — „Chlorknallgas" — setzt sich bei Belichtung unter Explosion in Salzsäuregas um nach der Gleichung $H_2 + Cl_2 = 2HCl$. Hier sieht es aus, als ob das Licht nicht Zersetzung, sondern chemische Bindung bewirkte. Doch ist die tatsächlich erfolgende Bindung der beiden Elemente zum Salzsäuremolekül nur ein Endvorgang, der auch keiner Aufwendung von Lichtenergie bedarf, sondern — wie die Explosion zeigt — sogar selbst beträchtliche Energiemengen liefert, der aber nicht ohne vorausgehende Zerlegung oder Lockerung mindestens eines der vorgegebenen Moleküle, H_2 und Cl_2, zu einzelnen Atomen erfolgen kann, wie die Umsetzungsgleichung zeigt. Es ist das Cl_2-Molekül, auf welches das Licht hier wirkt, was dadurch erwiesen ist, daß nur Wellenlängen wirksam sind, die vom Chlor absorbiert werden. Das gelbliche Chlor absorbiert Blau und Violett sowie Ultraviolett, und nur diese Lichter wirken.

100. Ein ähnliches Beispiel von chemischer Lichtwirkung ist die Ozonbildung aus Sauerstoff nach der Gleichung $3O_2 = 2O_3$. Hier ist die Zerschüttelung des O_2-Moleküls durch das Licht Voraussetzung der Umgruppierung.

Da Sauerstoff nur Ultraviolett absorbiert, kann auch nur dieses Licht wirken. Die Absorption des Sauerstoffs beginnt im Quarzkristallviolett (Tab. 38, bei etwa 200 $\mu\mu$ Wellenlänge), und ebendort beginnt auch die Ozonbildung. Die Umsetzung nach obiger Gleichung ist übrigens nicht vollständig, sondern es kehrt immer ein Teil der zerschüttelten O_2-Moleküle wieder zum gewöhnlichen Sauerstoff, O_2, zurück. Außerdem absorbiert Ozon selbst das Ultraviolett, wodurch zugleich mit der Erzeugung des Ozon auch eine Zerstörung desselben, eine Zerschüttelung der O_3-Moleküle durch das Licht einsetzt, was zu einem Gleichgewichtszustand im belichteten Sauerstoff führt, mit gewissem Ozongehalt, der von der wirkenden Wellenlänge abhängt.

Da Quarzkristallviolett im Sonnenlicht enthalten ist, wirkt dasselbe auch ozonbildend, allerdings merklich nur auf hohen Bergen; in der Tiefe, an der Erdoberfläche, ist das wirksame Licht eben durch die Absorption in der Atmosphäre schon verbraucht.

Die Ozonbildung in der Luft hat stets auch *Nebelkernbildung* (W 231) zur Folge; denn die Atmosphäre enthält stets geringe Mengen von allerlei Dämpfen und fremden Gasen, die mit dem Ozon feste Produkte bilden, so ist z. B. Ammoniak vorhanden, das mit Ozon salpetrigsaures und salpetersaures Ammon ergibt. Diese festen Stoffe schweben dann als kleine Molekülgruppen in der Luft, und sie können — in großen Höhen gebildet — dort als Kerne der Wasserdampfverflüssigung wirken, wo die von der Erdoberfläche stammenden Nebelkerne nicht hingelangen[1]).

101. Zu den chemischen Wirkungen des Lichts gehören auch die *physiologischen Wirkungen* desselben. Es wurde schon die durch das Ultraviolett der Sonne bewirkte Hautbräunung und Entzündung erwähnt (98); aber auch das *Sehen*, die Wirkung des Lichts auf die Netzhaut des Auges gehört hierher. Was das Licht sichtbar macht, sind seine *elektrischen* Kräfte, denen alle chemischen Wirkungen zugehören (92, E 431).

Die zur Sichtbarkeit führende Lichtwirkung auf die Netzhaut erfordert bei genügender Intensität nur sehr kurze Zeiten, wie es die gute Sichtbarkeit elektrischer Funken zeigt (E 27). Dagegen hat die Lichtwirkung eine verhältnismäßig lange Nachdauer. Dies wird im *Kinematographen* benutzt, der schon mit **16** (besser mit 24) Bildern in der Sekunde den vollkommenen Eindruck von Bewegungsvorgängen vermittelt, indem die dunklen Zwischenzeiten der Bilder vermöge der Nachdauer der Lichtwirkung in der Netzhaut nicht wahrgenommen werden.

Wichtig für das höhere Leben auf Erden ist auch die *Tötung der kleinsten, in der Luft schwebenden Lebewesen* — der Feinde der höheren Organismen — durch das Sonnenlicht.

Daß alles was überhaupt Wirkung auf Lebensvorgänge hat, auch zu *Heilzwecken* verwertet werden kann, ist selbstverständlich, so auch das Ultraviolett der verschiedenen Gebiete.

---

[1]) Außer dem ultravioletten Licht wirken in den höheren Schichten der Erdatmosphäre auch Kathodenstrahlen, ebenfalls von der Sonne ausgesandt und in den Nordlichtern merklich, ozonbildend (E 442) und damit auch nebelkernbildend. Daß diese Strahlungen die Luft in großen Höhen auch elektrisch leitend machen, ist eine besondere, von der Nebelkernbildung verschiedene Wirkung (E 470, 507, W 232, 233).

d) Kaltes Leuchten.

Wir untersuchen hier die Lichtquellen, welche die Energie der von ihnen ausgesandten Wellen nicht ihrem Wärmeinhalt entnehmen und die deshalb zu ihrem Leuchten keiner erhöhten Temperatur bedürfen.

Dazu gehören die fluoreszierenden und phosphoreszierenden Körper, die ihre Leuchtenergie aus absorbiertem Licht nehmen (vgl. 92), aber auch in chemischer Umsetzung befindliche Körper, die sie ihrer chemischen Energie entnehmen (119).

Fluoreszenz.

102. Es gibt viele Flüssigkeiten, besonders Lösungen von Farbstoffen, die, geeignet beleuchtet, in ihrem Inneren selbstleuchtend sich zeigen und zwar mit einer jeweils dem betreffenden Stoff eigenen, besonderen Farbe, die nicht mit der Farbe der Beleuchtung übereinstimmt; man nennt sie fluoreszierend. Am geeignetsten zur Beleuchtung — zur Erregung der Fluoreszenz — ist im allgemeinen das kurzwellige Licht: Blau, Violett und Ultraviolett (104).

Eine trübe Flüssigkeit, in welcher Teile mit fremdem Brechungsexponenten schweben, kann auch wie selbstleuchtend erscheinen, wenn man sie belichtet; denn die schwebenden Teile reflektieren das Licht nach allen Seiten auseinander, was für das Auge ganz den Eindruck des Selbstleuchtens der trüben Flüssigkeit aus ihrem ganzen Inneren macht (11 Note). Das Besondere der Fluoreszenz ist aber, daß das aus der Flüssigkeit kommende Licht andere Wellenlängen hat als das hineinfallende Licht. Man sieht, daß fluoreszierende Körper die Eigenschaft haben, das Licht umzufärben (vgl. 54), und dies ist das Wesentliche, das Fluoreszenz von Trübung unterscheidet.

103. Eine verdünnte wässerige Lösung des wegen seiner besonders auffallenden Fluoreszenz Fluoreszein genannten Benzolabkömmlings, beispielsweise, erscheint im durchfallenden Licht gelb; in der Draufsicht aber, am besten vor dunklem Hintergrund betrachtet, leuchtet die Lösung prachtvoll grün, als wäre sie Malachit. Das Fluoreszein, als gelber Farbstoff, absorbiert das Blau aus dem Tageslicht; eben deshalb erscheint es in der Durchsicht gelb (53). Die Energie des absorbierten blauen Lichtes strahlt es wieder aus in Gestalt des ihm eigenen malachitgrünen Lichtes. Fehlt das Blau im einfallenden Lichte, so fehlt auch die Erscheinung; bei roter Beleuchtung ist die Lösung von klarem, reinem Wasser nicht zu unterscheiden; bei blauer Beleuchtung zeigt sie sich sofort wieder in den grünleuchtenden Malachitblock verwandelt.

Ganz ebenso, nur mit Verschiedenheiten der in Betracht kommenden Farben (Wellenlängen), ist es auch bei allen übrigen fluoreszierenden Körpern: Licht einer Wellenlänge wird absorbiert und dafür Licht einer anderen Wellenlänge ausgestrahlt. Wärmewirkungen und chemische Wirkungen des absorbierten Lichtes können vollkommen fehlen; alle absorbierte Lichtenergie erscheint dann wieder als Licht.

Andere Beispiele von fluoreszierenden Flüssigkeiten sind Eosinlösung (roter Farbstoff, rotgelb fluoreszierend), Chlorophyll-Lösung (grün, tiefrot fluoreszierend), Chininlösung (farblos, blau fluoreszierend). Von festen Körpern ist uranoxydhaltiges Glas („Uranglas") zu nennen, ein klares, schwach gelbliches Glas mit heller grüner Fluoreszenz (ähnlich also der Fluoreszeinlösung). Außerdem sind die kristallisierten Platinzyanüre als hervorragend fluoreszenzfähig zu

nennen, z. B. Bariumplatinzyanür (gelb, grün fluoreszierend). Auch Gase sind fluoreszenzfähig, z. B. Joddampf.

104. Wie bei aller Lichtwirkung ist auch bei der Fluoreszenz Absorption des Lichtes, das wirken soll, Vorbedingung; nur Wellenlängen, die absorbiert werden, können fluoreszenzerregend wirken.

Vergleicht man bei den verschiedenen fluoreszenzfähigen Stoffen die Wellenlängen des erregenden, absorbierten Lichts mit denen des erregten, ausgestrahlten (Fluoreszenz-) Lichtes, was einwandfrei bei reiner spektraler Beleuchtung und mit gleichzeitiger spektraler Zerlegung des erregten Lichtes geschehen kann, so findet man, daß das erregte Licht (zumeist) längerwellig ist als das erregende („Stokes' Regel", vgl. 106). Dies kommt auch in der schon vorangestellten Angabe zum Ausdruck, daß kurzwelliges Licht am besten Fluoreszenz erregt. Rotes Licht könnte nach jener Regel nur ultrarote, also unsichtbare Fluoreszenzen erregen. Grünes Licht, das z. B. von Eosin absorbiert wird, kann schon dessen gelbrote Fluoreszenz erregen; die blaue Fluoreszenz des schwefelsauren Chinins kann dagegen nur durch violettes und ultraviolettes Licht erregt werden.

Fluoreszenz ist, entsprechend jener Regel, ein vortreffliches Mittel, ultraviolettes Licht unmittelbar sichtbar zu machen. Eine Platte aus Uranglas oder ein mit Bariumplatinzyanür überzogener Schirm, in den ultravioletten Teil eines Spektrums gehalten, macht sofort etwa dort befindliche Spektrallinien in der diesen Stoffen eigenen grünen Fluoreszenzfarbe sichtbar.

105. Untersucht man eingehend die spektrale Zusammensetzung des Fluoreszenzlichtes der verschiedenen Stoffe, so findet man bei festen und flüssigen Körpern im allgemeinen Banden, bei Gasen Linien, was nach früherer Überlegung (80, 81) verständlich ist, ebenso daß auch bei festen und flüssigen Körpern in gewissen Fällen mehr oder weniger scharfe Linienfluoreszenzen vorkommen können. Besonders wenn zur Erregung das Licht einer Spektrallinie benutzt wird, kann auch das erregte Licht eine Linie oder deren mehrere zeigen (zuerst bei Benzol beobachtet, „Raman-Effekt". Über die Beziehung zu Eigenschwingungszahlen der Moleküle s. 106).

Durchweg scharfe Linienfluoreszenzen fester Körper kommen im Gebiet der Hochfrequenzstrahlen (vgl. Abb. 39) vor. Die Erregung muß hier, entsprechend jener Regel (104), mit noch kürzeren Wellen, also auch durch Hochfrequenzstrahlen erfolgen[1]). Diese Hochfrequenzfluoreszenzen gehören den einzelnen Atomen zu, aus welchen der betreffende Stoff besteht. In welcher Umgebung oder Bindung die Atome sich befinden, ist dabei gleichgültig; es genügt das Vorhandensein der Atome zum Erscheinen derjenigen bestimmten Linien, welche ihnen demnach zugehören. Es wirken hier die Atome im festen Körper, sei er Element oder Verbindung, als wären sie frei und allein, wie etwa im Gaszustand. Dies läßt annehmen, daß diese sehr kurzwelligen Emissionen aus dem Inneren der Atome kommen und daß dieses Innere durch die äußeren Teile der Atome vor den Einwirkungen der Umgebung geschützt ist (vgl. 81).

Die Unabhängigkeit der Hochfrequenzfluoreszenzen von der Bindungsweise

[1]) Die Erregung kann auch — wie übr gens fast bei jeder Fluoreszenz (und Phosphoreszenz) — durch Kathodenstrahlen erfolgen (E 498).

der Atome, welchen sie zugehören, macht diese Fluoreszenzen zu einer leicht zugänglichen Erscheinung; jeder Stoff, in welchem das betreffende Element irgendwie enthalten ist, gibt bei geeigneter Erregung (mit Hochfrequenzstrahlen oder mit Kathodenstrahlen) die Hochfrequenzlinien des Elements. Es können daher diese Fluoreszenzen auch zum Nachweis des Vorhandenseins des betreffenden Elements dienen, zumal die Wellenlängen der Linien in einfacher Weise mit der Ordnungszahl des Elements zusammenhängen (E 502).

Die Fluoreszenzen im sichtbaren Gebiet sind eine weit weniger verbreitete Erscheinung; sie gehören nur bestimmten Atomgruppierungen zu, wie bei den erwähnten Farbstoffen; zumeist ist die Absorption im sichtbaren Gebiet nur mit Wärmewirkung verbunden.

106. Die Regel, daß das Fluoreszenzlicht längere Wellen hat als das erregende (104), hängt offenbar zusammen mit dem quantenmäßigen Arbeiten der Atome und Moleküle (W 181, 182).

Wenn das fluoreszenzfähige Atom (Molekül) das erregende Licht der Wellenlänge λ_1 absorbiert, so geschieht das mit der Schwingungszahl $n_1 = c/\lambda_1$ (52, A Gl. 5); demnach nimmt das Atom bei der Absorption Energiequanten von der Größe hn_1 auf. Von dieser aufgenommenen Energie kann ein Teil p in Wärme (Bewegung der ganzen Atome oder Moleküle) übergehen, so daß nur der andere Teil q als Fluoreszenzlicht ausgestrahlt wird. Ist dem Atom die Emissionsschwingungszahl n_2 eigen, so strahlt es Energie in den zugehörigen Beträgen $q = hn_2$ aus, wobei $hn_2 + p = hn_1$. Danach muß $n_2 < n_1$ und daher $\lambda_2 > \lambda_1$ sein, und dies ist Stokes' Regel.

Es kann aber offenbar auch vorkommen, daß das Atom (Molekül) vor oder bei Emission des Fluoreszenzlichtes Energie aus der Wärmebewegung aufnimmt (p negativ), und in diesem Falle wäre $n_2 > n_1$, $\lambda_2 < \lambda_1$, was der manchmal vorkommenden Überschreitung von Stokes' Regel gleichkommt.

Ist der Energieübergang p in Wärme ebenfalls mit einer Schwingungszahl, n_3, verknüpft (wie z. B. in festen Körpern, W 57), so gilt $p = hn_3$, und es ist dann $hn_2 + hn_3 = hn_1$, also $n_1 = n_3 + n_2$; die Schwingungszahl n_1 des eingestrahlten Lichtes hat sich dann in zwei Schwingungszahlen geteilt, von denen die eine, n_3, dem Atom (Molekül) als Ganzem, die andere, n_2, dem Fluoreszenzlicht zugehört. Derartiges ist ebenfalls beobachtet; n_3 kann dabei einer Absorptionsstelle des bestrahlten Körpers (z. B. im Ultrarot) entsprechen[1]).

107. Hervorhebenswert ist noch der Fall der genauen Gleichheit der Wellenlängen des absorbierten und des emittierten Lichtes, $\lambda_1 = \lambda_2$, „Resonanzstrahlung" genannt. Belichtet man Natriumdampf, der in ausgepumpter Glaskugel über etwas erwärmtem Natriummetall sich befinden mag, mit dem konzentrierten Lichte einer natriumhaltigen Bunsenflamme, so kann man den Lichtkegel im Natriumdampf allseitig dasselbe gelbe Natriumlicht ausstrahlen sehen, welches er empfängt. Daß nicht Trübung des Dampfes vorliegt, zeigt

---

[1]) Wenn die Energie hn_3 an ein Elektron im bestrahlten Körper abgegeben wird, so kann dieses entweichen. Man hat dann lichtelektrische Wirkung (E 465) mit nur teilweisem Verbrauch der Wellenenergie; der Rest derselben entweicht mit verringerter Schwingungszahl, wie bei Fluoreszenz. Dies kommt bei Einstrahlung gesonderter Wellenzüge vor („Compton-Effekt", s. 165 u. E 475).

sich schon daran, daß die Erscheinung nur bei genauer Gleichheit der Schwingungsdauer (Wellenlänge) des einfallenden Lichtes und der dem Dampfe selbst für Emission und Absorption eigenen Schwingungsdauer (Wellenlänge) auftritt, welche Bedingung allerdings für jede Art kräftiger Resonanz maßgebend ist. Die Erscheinung ist analog dem Ertönen einer Stimmgabel, die im Wellenzug einer anderen, ihr gleichen Gabel steht (A 83). Auch hier wird das schwingungsfähige Gebilde nur vermöge der genauen Gleichheit seiner Eigenschwingungsdauer mit der der Wellen zu merklichem Mitschwingen und dadurch zu eigener Wellenaussendung erregt.

Phosphoreszenz.

108. Die Tatsache lichterregten Eigenleuchtens, wie es die Fluoreszenz schon zeigte, wird am deutlichsten, wenn das Eigenleuchten die erregende Belichtung überdauert. Dies ist der Fall der Phosphoreszenz. Phosphoreszenzfähige Körper werden auch „Phosphore" genannt. Belichtet man einen solchen Körper in geeigneter Weise — z. B. eine Minute lang am Sonnenlicht — und bringt ihn danach ins Dunkle, so sieht man sein Nachleuchten, das mit abnehmender Intensität — je nach Art des Phosphors — auch noch stundenlang wahrnehmbar bleiben kann.

109. Durch helles und langes Nachleuchten hervorragend sind die Erdalkalisulfidphosphore, an denen auch die aufschlußreichsten Studien über Phosphoreszenz überhaupt gemacht sind. Sie enthalten neben dem Sulfid (CaS, SrS, BaS oder auch ZnS) kleine Mengen eines Metalles (Cu, Mn, Bi, Sb, Ni, Ag, Pb) als wesentlichen, die Phosphoreszenz bedingenden und ihre Eigenschaften bestimmenden Bestandteil. Dieses „wirksame Metall" muß in besonderer Weise an das Erdalkalisulfid gebunden sein zu bestimmten Atomgruppen, den „Phosphoreszenzzentren" oder kurz „Zentren", von denen die Lichtemission ausgeht.

Diese Zentren entstehen bei hoher Temperatur. Es muß zur Herstellung eines solchen Phosphors das Gemisch von Erdalkalisulfid mit der geeigneten, sehr geringen Menge irgendeiner Verbindung des wirksamen Metalles bei Glühhitze in weichen Zustand gebracht werden, was durch Zusatz eines nicht allzu hoch schmelzenden farblosen Salzes („Schmelzzusatz", z. B. Na_2HPO_4, $CaFl_2$) ermöglicht wird. In diesem Zustande guter Diffusionsmöglichkeit der Bestandteile gruppieren und binden sich offenbar die gegebenen Atome zu den phosphoreszenzfähigen Zentren, die dann bei Erkaltung des Ganzen erhalten bleiben.

Sehr viel Einzelkenntnis ließ übereinstimmend schließen, daß die Zentren langdauernden Leuchtens („Dauerzentren") große Atomgruppen sind, bestehend aus sehr vielen Atomen des Erdalkalimetalls und des Schwefels und je einem Atom des wirksamen Metalles (bezw. einigen wenigen dieser Atome). Der ganze Phosphor besteht nur zu einem geringen Teil aus Zentren, die in ihm verstreut sind; der Rest ist bei der Herstellung entstandenes Erdalkalisulfat oder Oxyd oder auch überschüssiges Sulfid.

Die Zentren sind durch Druckkräfte zerstörbar; Zerkleinerung eines harten Phosphors in der Reibschale vermindert sehr seine Phosphoreszenzfähigkeit. Doch sind dabei nicht normale Kräfte wirksam, sondern nur tangentiale (oder gar Zug, vgl. M 269, 264); denn unter Flüssigkeitsdruck findet keine Zerstörung statt.

110. Die Lichtemission der Phosphore besteht im allgemeinen aus Banden. Nur die seltenen Erdmetalle geben als wirksame Metalle Phosphore mit Linien-

emission, wie sie auch beim Leuchten infolge hoher Temperatur im festen Zustand Linienemission geben (vgl. 81).

Jedem wirksamen Metall gehören mehrere Phosphoreszenzbanden zu, z. B. hat Kupfer in CaS 3 Banden, eine grüne α, eine blaue β und eine rote γ (vgl. Abb. 41), die aber nicht alle auf einmal zu erscheinen brauchen.

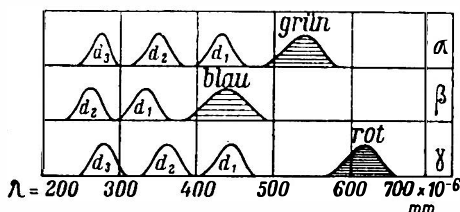


Abb. 41. Banden (schraffiert) und Erregungsverteilungen (d) von Cu in CaS.

Jede einzelne Phosphoreszenzbande hat ihre Besonderheiten; sie wird durch besondere Wellenlängen am besten erregt, zeigt bestes Nachleuchten bei besonderer Temperatur und wird durch besondere Bedingungen der Herstellung des Phosphors (Schmelzzusatz, Glühtemperatur, Metallmenge) bevorzugt. Es gehört danach jeder solchen Bande eine besondere Zentrenart zu, und ein Phosphor mit mehreren Banden verhält sich wie ein Gemisch mehrerer verschiedener Phosphore mit den verschiedenen Zentren, die voneinander unabhängig wirken.

111. Die am besten erregend wirkenden Wellenlängen werden für jede Bande zusammengefaßt in der „Erregungsverteilung" der Bande. Abb. 41 zeigt beispielsweise die Erregungsverteilungen der genannten 3 Kupferbanden in CaS. Die mit d_1, d_2, d_3 bezeichneten Wellenlängen (Spektralstellen) erregen das Leuchten der Bande am besten; die dazwischen befindlichen Spektralstellen erregen es vergleichsweise wenig. Man sieht diese Erregungsverteilung hell nachleuchtend auf dem flächenhaft ausgebreiteten Phosphor, wenn man ihn unerregt in einem reinen Spektrum belichtet hat. Die Zahl der „d-Erregungsstellen" ist nicht auf zwei oder drei beschränkt, sondern die Reihe dieser Stellen setzt sich mit abnehmenden Abständen serienmäßig (vgl. 82) nach kurzen Wellen hin fort, allerdings mit abnehmender Wirksamkeit (wobei hier nicht zu verfolgende Besonderheiten auftreten).

Das vorzugsweise erregende Licht dieser d-Stellen wird vom betreffenden Phosphor auch vorzugsweise absorbiert, solange er unerregt ist; ist aber die Erregung vollzogen, so ist damit diese „erregende Absorption" verschwunden; der Phosphor ist dann durchlässig für dieses Licht geworden.

112. Wie bei der Fluoreszenz, so gilt auch bei der Phosphoreszenz die Regel (104), daß die erregenden Wellen kürzer sind als die erregten des Eigenlichtes; die Erregungsverteilung beginnt stets an der kurzwelligen Seite der Bande. Meist ist der Zwischenraum von der Bande bis zur Erregungsverteilung nicht groß (vgl. Abb. 41 α und β), und daher werden Phosphore, deren Banden im sichtbaren Gebiet liegen, meist auch sehr gut durch sichtbares Licht, Sonnen- oder Tageslicht erregt. Es ist dies um so mehr der Fall, als schon das Licht einer einzigen d-Erregungsstelle zur vollen Erregung der betreffenden Bande genügt. Bei einigen Banden findet eine kleine Überschreitung der Regel statt, insofern als Bande und Erregungsverteilung etwas ineinander greifen. Es kann mit Bezug auf das quantenmäßige Arbeiten der Atome zu alledem dasselbe bemerkt werden, wie bei der Fluoreszenz (106).

113. Die spektralen Erregungsstellen der Phosphore bedeuten Eigen-

schwingungsdauern der Absorption in den Zentren und zwar müssen diese Eigenschwingungsdauern dem Atom des wirksamen Metalles zugehören in dessen eigentümlicher Bindung, wie sie in den Zentren vorhanden ist. Denn die Erregungsverteilung ist, wie die Bande, durch das Metall bedingt. Mittels dieser Eigenschwingungsdauern erhält das Metallatom die Energie aus dem erregenden Lichte, die dann zur Bandenemission verfügbar ist. Daß die Metallatome hier ganz wie elektrische Resonatoren wirken, entsprechend aller sonstigen Anzeige über das Verhalten der Atome den Lichtwellen gegenüber (90), dies hat hier noch einen besonderen Nachweis quantitativer Art erfahren. Es gilt für elektrische Resonatoren, daß ihre Eigenschwingungsdauern von der Dielektrizitätskonstante der Umgebung abhängen, in welcher ihr elektrisches Kraftfeld verläuft, und zwar ändert sich die Schwingungsdauer proportional der Quadratwurzel aus der Dielektrizitätskonstante (E 397). Dies konnte bei den Phosphoren geprüft werden, indem man dasselbe Metall, z. B. Kupfer, in den drei Erdalkalisulfiden untersuchte, deren Dielektrizitätskonstanten an den betreffenden Phosphoren selbst gemessen werden konnten. Es zeigte sich, daß die Erregungsverteilungen beim Übergang von CaS- zu SrS-, zu BaS-Phosphoren in der Tat ganz entsprechend der steigenden Dielektrizitätskonstante nach den längeren Wellen hin (größeren Schwingungsdauern) vorrücken und zwar bei den Banden aller Metalle.

Auch die Schwingungsdauern der Emission werden durch die Umgebung des Metallatoms beeinflußt, jedoch nicht in so einfacher, mit der mittleren Dielektrizitätskonstante des ganzen Phosphors zusammenhängender Weise. Es ist das vielleicht schon daraus verständlich, daß eine zu absorbierende Welle von außen, aus der Umgebung des absorbierenden Atoms an dasselbe herankommt, während die emittierte Welle von innen her, aus dem Atom selbst, sich entwickelt[1]).

Daß jedes absorbierende Atom die Energie der Lichtwellen sogar aus sehr weiter Umgebung heranzieht und aufnimmt, dies ist durch mehrartige besondere Messungen an Phosphoren festgestellt.

114. Einfluß der Temperatur. — Das Nachleuchten der Phosphoreszenzbanden erfolgt nicht bei jeder Temperatur in gleicher Weise, sondern jede Bande hat mit ihren Zentren drei Temperaturbereiche oder Temperaturzustände verschiedenen Verhaltens. In bestimmter mittlerer Temperaturhöhe, z. B. bei der grünen Bande α des Cu in CaS von -180^0 bis $+200^0$, findet man das für die Phosphoreszenz charakteristische, dauernde Nachleuchten — „Dauerzustand" —; bei höheren Temperaturen — „Hitzezustand" (oder „oberer Momentanzustand") —, sowie auch bei tieferen — „Kältezustand" (oder „unterer Momentanzustand") — fehlt das Nachleuchten der Bande trotz erregender Belichtung, jedoch in diesen beiden Fällen in verschiedener Weise: In der Hitze fehlt die Erregbarkeit der Bande (d. i. ihrer Zentren) durch Licht; in der Kälte ist die Erregbarkeit wohl vorhanden, jedoch die Erregung wird

[1]) Die Erregungsverteilungen der Phosphore der seltenen Erden bestehen aus Banden; nur die Emission zeigt Linien. Dies stimmt damit überein, daß die erregende Absorption (Energieaufnahme) in äußeren Teilen, die Emission aber aus inneren Teilen der Atome erfolgt und daß die linienverwaschenden Störungen der Umgebung nur das Äußere, nicht das Innere der Atome ergreifen (vgl. 80, 81, 86).

„aufgespeichert" und nicht zu Leuchten verausgabt. Dieses letztere Verhalten (im Kältezustand) ist besonders bemerkenswert. Bestrahlt man den Phosphor mit erregendem Licht bei genügend tiefer Temperatur, so bleibt er nichtleuchtend; es ist die Energie des absorbierten erregenden Lichtes in ihm (in den Zentren der Bande) aufgespeichert derart, daß sie nicht zu Lichtemission verbraucht wird, aber auch nicht in die Wärmebewegung übergeht; sie bleibt zu späterer Lichtemission verfügbar. Die Emission erfolgt erst, wenn die Temperatur genügend (bis in den Dauerzustand der Bande) gesteigert wird; der Phosphor leuchtet dann auf und verausgabt innerhalb genügend langer Zeit alle aufgespeicherte Energie als Licht.

Die Menge dieser aufgespeicherten Energie ist meßbar als „Lichtsumme" — Zeitintegral der ausgesandten Lichtintensität[1]) — des erregten Phosphors; man findet sie (bei gleichbleibender Erregungsweise) von konstanter Größe, unabhängig von der Zeitdauer der Verausgabung. Diese Zeitdauer — die Dauer merklichen Nachleuchtens — ist je nach der Temperatur verschieden. Je höher die Temperatur ist (je näher dem Hitzezustand oder oberen Momentanzustand der Bande), desto kürzer ist die Zeit der Verausgabung der aufgespeicherten Lichtsumme, desto heller leuchtet also der Phosphor anfangs, desto schneller wird er dann aber auch dunkel. Je tiefer dagegen die Temperatur ist (je näher dem Kältezustand oder unteren Momentanzustand der Bande), desto länger dauert das gesamte Nachleuchten, desto weniger hell muß es bei der unveränderten Lichtsumme aber auch sein. Bei den tiefsten Temperaturen (im Kältezustand) wird die Dauer des Leuchtens unendlich, die Intensität daher — weil die Lichtsumme endlich ist — Null, was mit der vorangestellten Angabe über den Kältezustand übereinstimmt.

Die so für das Nachleuchten — sei es bei konstant gehaltener Temperatur oder auch bei Temperaturänderung — maßgebenden drei Temperaturzustände haben für verschiedene Banden (desselben Phosphors oder verschiedener Phosphore) sehr verschiedene Lagen. Die oben als Beispiel angegebene grüne Bande des Kupfers in CaS hat Dauerzustand in ziemlich weitem Bereich ober- und unterhalb der Zimmertemperatur; solche Banden zeigen ihr gutes Nachleuchten ohne weiteres bei Zimmertemperatur („Hauptbanden"). Eine Bande mit hochliegendem Dauerzustand ist z. B. die blaue Bande des Sb in CaS, die bei +200° bestes Nachleuchten hat („Hitzebande", deren Hitzezustand oder oberer Momentanzustand demnach noch höher in der Temperatur liegt). Eine Bande mit sehr tief liegendem Dauerzustand ist die gelbe Bande des Ni in CaS; sie entwickelt ihr bestes Nachleuchten in der Gegend von —180° („Kältebande"). Der Kältezustand (unterer Momentanzustand) solcher Banden liegt sehr tief; doch genügt die Temperatur des flüssigen Wasserstoffs (—250°) für die allermeisten Banden, um sie in diesen Zustand scheinbaren Nichtleuchtens mit außerordentlicher Dauerhaftigkeit der Aufspeicherung zu bringen. Die für volle Erregung notwendige Belichtungsdauer wächst dann allerdings ebenfalls stark an; es ist eine allgemeine Erfahrung, daß langsames „Abklingen" stets auch mit langsamem „Anklingen" verbunden ist.

115. Erregung von Lichtaussendung. — Das Studium der Phosphore hat auch zur Erlangung erster Erkenntnisse über Lichtemission und deren Erregung überhaupt geführt. Man konnte hier Einzelheiten am Leuchtvorgang beobachten, die bei den gewöhnlichen Lichtquellen, den heißen Körpern, nicht zugänglich sind. Schon die ursprünglich fernliegende Vorstellung, daß Erregung eines Atoms zur Lichtemission und die Lichtemission selbst

---

[1]) D. i. die Summe aller Produkte aus Intensität und deren Zeitdauer, genommen über die ganze Zeit des Leuchtens. Die Messung erfolgt am besten lichtelektrisch (E 467).

zwei verschiedene, gesondert zu betrachtende Vorgänge sind, war durch die Phosphore gegeben; diese zeigen die beiden Vorgänge in der Tat zeitlich getrennt — um Monate getrennt, wenn man will (114) —, so daß ihre gesonderte Untersuchung möglich ist. Beim Leuchten eines heißen, glühenden Körpers konnte es scheinen, als wären seine Atome in ihrer fortwährenden Wärmebewegung auch fortwährende Erzeuger von Lichtwellen, ähnlich wie eine Pfeife bei dauerndem Luftstrom fortwährende Quelle von Schallwellen ist. Dagegen zeigt der Phosphor die Vorgänge der Energiezufuhr (Erregung) und der Energieaussendung (Emission) etwa so getrennt wie bei einer gezupften Saite, welcher durch die Ausbuchtung die Energie zugeführt wird, die dann beliebig später erst, beim Loslassen, die Aussendung der Schallwellen ergibt, worauf neue Erregung erfolgen muß. Solches absatzweises, „quantenweises" Arbeiten, mit abwechselnder Aufnahme und dann Wiederabgabe von Energie ist beim Studium des Leuchtens der heißen Körper in der Tat auch gefunden worden (W 180); aber man konnte dabei nichts über die Vorgänge bei der Erregung eines Atoms und bei der Einleitung seiner Lichtemission erfahren. Hierzu haben die Phosphore gute Auskünfte gegeben. Es zeigte sich, daß mit ihrer Erregung stets lichtelektrische Wirkung verbunden ist, d. h. daß die erregenden Wellen (d-Stellen im Spektrum, 111, Abb. 41) Elektronen aus dem Phosphor entweichen machen (vgl. 92), und daß dieses Entweichen in jeder Beziehung aufs engste mit der Phosphoreszenzerregung verbunden ist und den Metallatomen in den Zentren der betreffenden Bande zuzuschreiben ist. Das Entweichen der Elektronen kann nur aus der freien Oberfläche des Phosphors stattfinden; im Inneren werden die durch das erregende Licht freigemachten Elektronen an Nachbarstellen der Phosphoreszenzzentren festgehalten. Die hieraus folgende Annahme, daß die Erregung der Bande in einer Elektronenverschiebung im Zentrum besteht, ist durch viele weitere Erfahrung bestätigt. Das Leuchten — die Verausgabung der Erregung — erfolgt dann bei der Rückkehr des Elektrons, das die Energie zum Leuchten mitbringt, und wonach das Bandenzentrum wieder in den unerregten Zustand zurückversetzt ist.

Die Aufspeicherung der Erregung besteht demnach in der Aufspeicherung des verschobenen Elektrons an einem fremden Atom, wo es lange verharren kann, ehe die Rückkehr und damit das Leuchten erfolgt. Die Wiederabtrennung des aufgespeicherten Elektrons, welche Vorbedingung für das Leuchten ist, wird durch die Wärmebewegung im Phosphor bewirkt; die große Beständigkeit der Aufspeicherung bei tiefsten Temperaturen („Kältezustand") und die steigende Geschwindigkeit der Abklingung der Bande bei steigender Temperatur und viel sonstige Erfahrung zeigen dies. Sehr bemerkenswert ist dabei die hohe Energieisolation der großen, langsam abklingenden Phosphoreszenzzentren, die inmitten lebhafter Wärmebewegung der Umgebung ihre aufgespeicherte Erregungsenergie wochen- und monatelang behalten (114), bis ein besonders wirksames Ereignis der Wärmebewegung sie zum Abklingen bringt. Dieselbe hohe Energieisolation zeigen diese Zentren auch bei der Ausleuchtung (117) dadurch, daß sie ihre molekular-lokale hohe Temperatur (vgl. W 128) auch nach ausleuchtender Belichtung noch eine Weile behalten, was aus der Nachdauer des Aufleuchtens ersichtlich ist.

Die so aus dem Studium der Phosphoreszenz entwickelte Kenntnis von

Lichtemission und deren Erregung ist auch allgemein bei den sonstigen Leuchtvorgängen bewährt, soweit diese untersucht sind. Verschieden ist bei den verschiedenen Leuchtvorgängen nur die Energielieferung zur Abtrennung oder Verschiebung des Elektrons bei der Erregung. Bei Fluoreszenz und Phosphoreszenz erfolgt sie durch Lichtabsorption oder aber auch durch Kathodenstrahlen (bewegte Elektronen), die ebenfalls fluoreszenz- und phosphoreszenzerregend wirken und ebenfalls Elektronen abtrennen (E 493); auch beim Leuchten elektrischer Entladungen sind es bewegte Elektronen, die wirken (E 498); beim gewöhnlichen Leuchten infolge hoher Temperatur ist die Energie zur Erregung aus der Wärmebewegung entnommen (W 160).

Ist damit die Erregung von Lichtemission im allgemeinen insofern aufgeklärt, als sie Aufhäufung von Energie in verschobenen Elektronen der betreffenden Atome ist, und ist außerdem auch die quantenweise Verarbeitung der Energie gut gesichert (106, W 181) und der Vorgang der Wellenformung der Energie mit Recht gleich dem bei großen Oszillatoren zu denken (E 436), so ist doch für die Einleitung der Wellenformung mit der jeweils bestimmten Schwingungsdauer noch kein genügendes Verstehen gewonnen (vgl. 90, 165 und E 544).

116. Mißt man die bei der Erregung eines Phosphors von bekanntem Metallgehalt absorbierte Lichtenergie und auch die Energie des gesamten, dann ausgesandten Phosphoreszenzlichtes (die Lichtsumme, vgl. 114), so findet man, daß für je 1 Energiequant des erregend absorbierten Lichtes 1 Energiequant des Bandenlichtes erscheint, außerdem daß jedes Metallatom der Zentren nur ein Energiequant oder deren wenige aufspeichert. Dies entspricht ganz der quantenmäßigen Verwaltung der Energie durch die Atome (W 181). Außerdem zeigt sich, wegen der nahen Gleichheit der Lichtquanten bei nahe gleichen Wellenlängen des erregenden und des ausgesandten Lichtes (112), daß die *Umformung der Lichtenergie durch Phosphoreszenz entsprechend nahe verlustfrei* stattfindet.

117. Eine besondere Erscheinungsgruppe ist die „*Ausleuchtung*" und „*Tilgung*" *der Phosphore durch Licht*. Belichtet man einen erregten Phosphor mit geeigneten Wellenlängen, so sieht man ihn aufleuchten, als würde er erhitzt (vgl. 114); dies ist die *Ausleuchtung*. Dabei geht von der seit der Erregung im Phosphor aufgespeicherten Lichtsumme (114) nichts verloren; die Lichtsumme entweicht nur schneller, so wie es bei Temperatursteigerung des Phosphors auch geschehen würde (114). Eine diesem Aufleuchten entsprechende Temperatursteigerung des Phosphors findet aber bei der ausleuchtenden Belichtung gar nicht statt; die Energie selbst stark ausleuchtenden Lichtes wäre auch viel zu gering dazu. Da dennoch das Aufleuchten mit bestimmter Nachdauer und mit der nach Erschöpfung der Lichtsumme eintretenden Verdunkelung samt allen sonstigen Einzelheiten ganz der Wirkung von Temperatursteigerung gleicht, ist anzunehmen, daß wohl Erhitzung stattfindet, daß aber das ausleuchtende Licht *nur die Zentren der betreffenden Bande erhitzt*, in welchem es auch absorbiert wird, während die übrigen, nicht wesentlich absorbierenden Moleküle des Phosphors kalt bleiben. Es ist das „*molekularlokale*" Temperaturerhöhung (W 128); sie ist möglich durch die Energieisolation der Zentren (115). Hiermit ist auch in Übereinstimmung, daß Phosphore mit mehreren, verschiedenfarbigen Banden bei Ausleuchtung Farbenfolgen zeigen,

die nicht gleicher, sondern verschiedener Temperatur der Zentren der einzelnen Banden entsprechen. Man sieht hier die Unanwendbarkeit des gewöhnlichen Temperaturbegriffes im Falle von Phosphoreszenz (und Fluoreszenz, W 129).

Tilgung ist nicht Austreibung, sondern Vernichtung der Lichtsumme eines erregten Phosphors durch Belichtung. Es tritt hier sofortige Verdunkelung des Nachleuchtens auf, und man findet nach Beendigung genügend fortgesetzter tilgender Belichtung keinen Rest von Lichtsumme im Phosphor übrig; er leuchtet bei Erwärmung bis zum Hitzezustand nicht mehr auf, sondern ist ganz in den unerregten Zustand zurückgebracht, ohne geleuchtet zu haben. Es ist nach vorhandenen Untersuchungen anzunehmen, daß das tilgende Licht Elektronen im Phosphor freimacht, die an die Stelle der bei der Erregung aus den Zentren verschobenen Elektronen (115) treten, die aber weniger Energie mit sich bringen als zur Emission der betreffenden Bande — der Größe ihres Lichtquants nach (W 181) — erforderlich wäre.

Ausleuchtung und Tilgung haben jede ihre besonderen spektralen Verteilungen für jede Bande, analog den Erregungsverteilungen (Abb. 41). Man kann daher durch Wahl geeigneter Wellenlängen nur oder vorzugsweise Ausleuchtung oder Tilgung hervorbringen. Auch zeigen gewisse Banden vorzugsweise die eine oder die andere der beiden Wirkungen. Bemerkenswert ist, daß auch Ultrarot Tilgung und Ausleuchtung hervorbringen kann. Man kann daher (nicht zu langwelliges) Ultrarot auf einer geeigneten, erregten Phosphoroberfläche nachweisen; sie wird verdunkelt (durch Tilgung sogleich, durch Ausleuchtung nach Vorbeigehen des Aufleuchtens) wo das Ultrarot auftrifft.

118. Kurzdauernde Phosphoreszenzen. — Nur wenige Phosphoreszenzen zeigen ähnlich lange Dauern des Nachleuchtens wie die bisher betrachteten der Metalle in den Erdalkalisulfiden; die meisten klingen — mindestens bei gewöhnlicher Temperatur — außerordentlich schnell ab. Um solches kurzdauerndes Nachleuchten untersuchen zu können, sind besondere Vorrichtungen, die „Phosphoroskope", erdacht und in Anwendung gebracht worden, die es erlauben, schnell hintereinander den zu untersuchenden Körper erregend zu belichten und im Dunkeln zu beobachten. Bewegte, lichtzulassende und -absperrende Schirme sind ihre Hauptbestandteile.

Die Zahl der in dieser Weise aufgefundenen, „phosphoroskopisch kurz" (z. B. einige Hundertelsekunden lang) merklich nachleuchtenden Stoffe ist sehr groß. Kalkspatkristalle z. B. leuchten im Phosphoroskop prachtvoll rot, gewöhnliches Glas grün, Flußspat blau oder auch in anderen Farben. Auch bei diesen Stoffen sind Spuren besonderer Metalle das Wesentliche für ihre Phosphoreszenz; so beim Kalkspat Mangan, bei Flußspat auch seltene Erdmetalle. Bei einigen Stoffen gehört aber die Phosphoreszenz der reinen chemischen Verbindung zu („Reinstoffphosphore", im Gegensatz zu den „Fremdstoffphosphoren"), so bei den Wolframaten, den Platinzyanüren und den Uransalzen.

Es ist nach allem über die Phosphoreszenz Vorgebrachten selbstverständlich, daß das nach Schluß der erregenden Belichtung sichtbare Leuchten auch schon während der Belichtung vorhanden ist — wenn auch nicht immer gleich gut sichtbar —, und insofern kann man alle phosphoreszenzfähigen Körper auch fluoreszenzfähig nennen. So haben wir die Platinzyanüre und Uranglas bereits

unter den fluoreszenzfähigen Körpern angegeben; vom Flußspat hat übrigens die Fluoreszenz sogar ihren Namen erhalten.

Kaltes Leuchten bei chemischen Umsetzungen.

119. Fluoreszenz und Phosphoreszenz sind hervorragende Beispiele kalten Leuchtens. Die Energielieferung erfolgt hier durch Licht, im Gegensatz zum gewöhnlichen Leuchten heißer Körper, wo sie durch Wärme erfolgt. Es ist jedoch noch ein Fall kalten Leuchtens zu betrachten, dessen Energie aus Vorrat chemischer Energie stammt. Schon das altbekannte Leuchten des langsam sich oxydierenden Phosphors ist ein Beispiel hiervon. Der Name „Phosphoreszenz" stammt daher[1]). Seither sind viele Fälle solchen kalten „chemischen Reaktionsleuchtens" eingehend untersucht worden.

Wesentlich für das Auftreten solchen Leuchtens ist neben dem Vorhandensein leuchtfähiger Atome (oder Moleküle) wohl stets eine mit großer Energie vorsichgehende chemische Umsetzung unter gewissen hemmenden Umständen, wozu auch große Verdünnung mit Stoffen gehört, die an der Umsetzung nicht beteiligt sind. Es tritt dann hohe Temperatur nur „molekular-lokal" auf (ähnlich wie bei der Ausleuchtung der Phosphore, 117), und die Leuchterregung (wohl wieder bestehend in Elektronenverschiebung, 115) kann durch Energieübergang von den hochtemperierten, d. i. in heftiger innerer Bewegung begriffenen, neugebildeten Molekülen an die leuchtfähigen Atome stattfinden (vgl. W 128).

Ein untersuchter Fall zeigt, daß dieser Energieübergang so vollkommen sein kann, daß keine wesentliche Menge der gegebenen chemischen Energie in die allgemeine Wärmebewegung des Reaktionsgemisches übergeht, so daß alle oder fast alle Energie als Licht erscheint.

Ein leicht vorführbares Beispiel von Reaktionsleuchten bietet das in Oxydation begriffene Pyrogallol in wäßriger, sehr verdünnter alkalischer Lösung. Es ist jedoch außer Pyrogallol und Sauerstoffvorrat in der Lösung noch ein Hilfsstoff (Sulfit, Formaldehyd) erforderlich. Außerdem erhöht ein fester Stoff mit großer Oberfläche (Tonerdefällung), an welcher die reagierenden Körper sich verdichten können, sehr die Helligkeit des Leuchtens. Ähnliche Nebenbedingungen gelten auch für andere Fälle von Reaktionsleuchten im flüssigen Zustand.

Dazu gehört auch das bei Lebewesen vorkommende kalte Leuchten, wovon Johanniskäfer, Feuerfliegen, das Meeresleuchten Beispiele sind. Es ist durch Untersuchung der von Leuchttieren entnommenen Stoffe festgestellt, daß auch hier ein Oxydationsvorgang die Energie des Leuchtens liefert. Das Besondere ist nicht nur die fehlende oder sehr geringe Wärmeentwicklung bei diesem Vorgang, wodurch die vorhandene chemische Energie ganz oder sehr vollständig als Lichtenergie verwertet wird, sondern außerdem auch das Spektrum des ausgesandten Lichtes. Dieses enthält in den meist vorkommenden Fällen des Leuchtens von Lebewesen fast nur sichtbare Wellenlängen, — kein Ultrarot, das die gewöhnlichen Lichtquellen, die heißen Körper, so sehr im Überschuß liefern, das aber für das Auge wertlos ist und das daher die gewöhnlichen Lichtquellen unwirtschaftlich macht (vgl. W 184). Es ist damit in dem Leuchten der Lebewesen die Lösung einer Aufgabe der Technik fertig gegeben: die Her-

[1]) Der Name galt ursprünglich für alles kalte Leuchten.

stellung einer Lichtquelle, welche alle verfügbare Energie als sichtbares und zwar dem Auge angepaßtes Licht ausstrahlt. Ohne Zweifel ist das Leuchten der Tiere besonders für die Augen eben dieser Tiere bestimmt; die Johanniskäfer z. B. finden einander dadurch im Dunkeln. Die Augen der Tiere sind aber, wie die der Menschen, für das Licht der Sonne, mit höchster Intensität im Grün (W 185) abgestimmt; daher die Geeignetheit dieses Leuchtens der Glühwürmer auch für die Augen der Menschen. Es liegt hier, in der fertigen Lösung der genannten Aufgabe, eines der vielen Wunder von Anpassung vor, wie die Lebenserscheinungen sie allenthalben bieten.

III. Wellenoptik.

120. Hierher gehören alle die vielen Erscheinungen, welche die Hauptnachweise für die Wellennatur des Lichtes gebracht haben und aus welchen auch die Längen der Lichtwellen und ihre geometrische Beschaffenheit — die Transversalität — ergründet wurden[1]). Es sind das sehr vielartige und mannigfaltige Erscheinungen; sie sind so eng mit der Wellennatur des Lichtes verbunden, daß man ohne an diese zu denken sie nicht nur nicht verstehen, sondern nicht einmal im Gedächtnis behalten könnte. Wir teilen sie im folgenden in fünf Hauptgruppen: Interferenz, Beugung, Polarisation, Kristalloptik, Drehung.

Die hier erforderlichen Kenntnisse über Wellen, insbesondere Wellenzüge haben wir im Vorhergehenden schon großenteils erläutert (3, 15, 22, 38). Weiteres wird im folgenden hinzugefügt (121, 122). Für Begründungen geben wir Hinweise auf die Akustik, wo Wellen ganz allgemein behandelt sind. Wichtig, besonders für die Beurteilung des weißen Lichtes, ist der für alle Wellen geltende Satz, daß beliebig verwickelte Wellenformen irgendwelcher Art gleich der Übereinanderlagerung einfacher (Sinus-) Wellen derselben Art sich verhalten (A 6, 64) und daß daher die Betrachtung einfacher Sinuswellen für alle Fälle genügt. Wir werden daher im folgenden stets Sinuswellenzüge voraussetzen, das sind Wellenzüge von der in Abb. 1 ersichtlichen Form.

a) Interferenzerscheinungen.

121. Es sind dies Erscheinungen, die dem Zusammentreffen zweier (oder mehrerer) Wellenzüge eigen sind; sie bestehen in stellenweiser (oder zeitweiser) gegenseitiger Vernichtung der zusammentreffenden Wellenzüge. Solche gegenseitige Vernichtung — „Interferenz" genannt — ist bei Wellen aller Art möglich[2]); sie kommt aber n u r bei Wellen vor; sie ist daher ein sehr wichtiges Nachweismittel des Daseins von Wellen. Dies beruht darauf, daß das Wesentliche eines Wellenzuges irgendwelcher Art die regelmäßige Aufeinanderfolge einander entgegengesetzter Zustände ist, seien diese Zustände Berg und Tal (wie bei der Seilwelle) oder Verdichtung und Verdünnung (wie bei der Schallwelle) oder sonst irgendwelcher Art (z. B. elektrische Kraft der einen Richtung und der entgegengesetzten Richtung). Dabei besteht das Einander-Entgegengesetztsein der Zustände eben darin, daß gleichzeitiges Vorhandensein beider Zustände am selben Orte in gleicher Stärke Nichtvorhandensein bedeutet, so wie beispielsweise die Resultierende zweier entgegengesetzt gleicher Verschiebungen oder Kräfte irgendwelcher Art Null ist (M 45). Zwei

[1]) Daß es elektromagnetische Wellen sind, dies zeigen die elektrischen Versuche (E 430); vgl. 3.

[2]) Man kann die Interferenzerscheinungen bei den Schallwellen zum Vergleich nehmen (A 68 u. f.).

Wellenzüge werden daher dort einander gänzlich vernichten, wo sie dauernd mit entgegengesetzt gleichen Zuständen zusammenkommen.

Der Abstand der aufeinanderfolgenden entgegengesetzten Zustände oder „Phasen" ist in jedem Wellenzug ½ Wellenlänge; die ganze Wellenlänge — stets mit λ bezeichnet — ist immer der kürzeste Abstand zweier gleicher Zustände. Die in einem Wellenzug vorkommenden Höchstwerte der Stärke des betreffenden Zustandes bestimmen die Amplitude des Wellenzuges. Beim Licht als elektromagnetischer Welle ist die Größe der elektrischen Kraft bestimmend für die Amplitude. Die Intensität, d. i. der Energieinhalt der Welle (vgl. 15), ist — wie bei den Schallwellen (A 44) — proportional dem Quadrat der Amplitude, d. i. beim Licht dem Quadrat des Höchstwertes der elektrischen Kraft in der Welle (E 123).

122. Gangunterschied. — Es werden demnach zwei Wellenzüge gleicher Wellenlänge und gleicher Intensität einander vernichten, wenn sie um ½ Wellenlänge gegeneinander verschoben zusammenkommen. Die Verschiebung kann durch einen Umweg zustande kommen, der in dem einen Teil eines ursprünglich einheitlichen Wellenzuges oder Strahles eingeschaltet wird. Es seien (Abb. 42) A und B zwei Wellenzüge, von links nach rechts fortschreitend, die von gemeinsamer Quelle kommen und daher mit einheitlichen, übereinstimmenden Zuständen nebeneinander herlaufen; sie haben gemeinsame Wellenfront oder Wellenfläche (vgl. 38). Die in den Abständen von je ½ Wellenlänge aufeinanderfolgenden, einander entgegengesetzten Zustände sind in der Abbildung durch ausgezogene und gestrichelte Linien bezeichnet. Es werde nun dem Wellenzug oder Strahl B ein Umweg über x beigebracht, welcher ½ Wellenlänge beträgt. Dann ist B gegen A um ½ Wellenlänge zurück, und es laufen daher von da ab die beiden Wellenzüge stets mit entgegengesetzten Zuständen nebeneinander her. Kommen sie (etwa durch Konvergenz oder aus sonstigem Grunde) zum Zusammenwirken, so müssen sie daher einander vernichten, Interferenz geben.

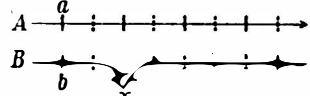


Abb. 42. Wellenstrahlen mit Gangunterschied.

Hierdurch ist schon das Wesentliche aller Interferenzerscheinungen dargestellt. Der Umweg des einen Strahls gegen den anderen, welcher den Zustands- oder Phasen-Unterschied bei ihrem Zusammentreffen ergibt, kann irgendwelcher, beliebig verursachter Wegunterschied der beiden Strahlen sein, gerechnet von der gemeinsamen Quelle aus oder auch von einem sonstigen Punkte gleicher Zustände aus (wie z. B. a und b in Abb. 42).

Ein solcher Wegunterschied oder Umweg wird oft „Gangunterschied" genannt, mit welchem Namen man aber auch ganz allgemein die Ursachen von Phasenunterschieden bezeichnet. Beträgt der Gangunterschied ½ Wellenlänge oder aber auch $^3/_2$ oder $^5/_2$ Wellenlänge, allgemein eine ungerade Zahl von halben Wellenlängen, so findet (bei gleicher Intensität) Auslöschung statt; beträgt aber der Gangunterschied eine gerade Anzahl von halben Wellenlängen, so findet Verstärkung statt. Dies ist die allgemeine und Haupt-Regel für die Interferenzen zweier Wellenzüge. Bei Gangunterschieden von zwischenliegender Größe ergeben sich mittlere Intensitäten, die man — wo nötig — ebenfalls durch Summierung der sinusförmig verteilten Zustände der beiden zusammentreffenden Wellen berechnen kann[1]).

Zu bemerken ist, daß Gangunterschiede — Zustands- oder Phasenunter-

---

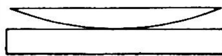
[1]) Vgl. den allgemeineren Fall der Berechnung der Interferenzen bei den Beugungserscheinungen (146).

schiede — auch **ohne Wegunterschied** entstehen können. Es kann **Zustandsumkehrung bei Reflexion** eines Strahles eintreten, was dem Verlust einer halben Wellenlänge oder dem Umweg von $\frac{1}{2}$ Wellenlänge gleichkommt (vgl. A 31). Oder es kann einer der beiden Wellenzüge oder Strahlen auf gewisser Wegstrecke eine andere Geschwindigkeit erhalten, indem er etwa einen anderen Stoff durchläuft (vgl. 41, 42) als der zweite, wobei auf diese Wegstrecke auch die (den Geschwindigkeiten proportionalen) Wellenlängen der beiden Strahlen verschieden sind (A Gl. 5). Der Gangunterschied ist dann durch den **Unterschied der Wellenzahlen** der beiden Strahlen auf den an Länge gleichen Wegstrecken gegeben, **auf welchen Unterschied es aber auch überhaupt, in allen Fällen ankommt.**

Die verschiedenen, sehr verschiedenartigen Interferenzerscheinungen, die wir im folgenden und bis zum Schluß der Optik betrachten werden, unterscheiden sich nur nach der Art des Zustandekommens der Gangunterschiede. Daß sie sämtlich nach den hier vorangestellten Gedanken restlos erklärlich werden, dies ist einer der besondersten Nachweise für die Wellennatur des Lichtes.

Farben dünner Blättchen.

123. **Erscheinungen bei weißem Licht.** — Dünne Schichten durchsichtiger Stoffe zeigen, im reflektierten weißen Licht vor dunklem Hintergrund betrachtet, Farbenerscheinungen, oft von großer Pracht, die schon in frühesten Zeiten aufgefallen sein müssen. Jeder Öltropfen, der auf eine Wasseroberfläche gefallen zu dünner Schicht sich ausbreitet, zeigt diese Farben; ebenso sieht man sie an Seifenblasen. Die „Anlauffarben" blanker, erhitzter Stahlflächen oder auch anderer Metallflächen sind gleichen Ursprungs; sie gehören den dünnen Oxydschichten zu, die genügend lichtdurchlässig sind um die Erscheinung zu geben. Auch dünne Luftschichten, die in gesprungenem Glas sich finden, die man aber auch beim Aufeinanderpressen zweier genügend ebener Glasstücke erhält, zeigen diese Farben, die auch der Perlmuttermuschel eigen sind.


Abb. 43. Newtons Farbenglas.

Newton hat diese Farben dünner Blättchen an Luftschichten zuerst eingehend studiert (1704). Er legte dazu eine schwach gekrümmte Linse auf ein Planglas (Abb. 43). In der Mitte, wo die beiden Gläser einander berühren, ist die Dicke der Luftschicht Null, und um diesen Mittelpunkt herum finden sich nach außen hin wachsende Dicken der Luftschicht kreisförmig angeordnet. Dementsprechend sind auch die Farben kreisförmig verteilt, die man beim Betrachten der Luftschicht im reflektierten Licht sieht, was anzeigt, daß gleich dicke Luftschichten gleiche Farbe geben und daß jeder Dicke eine andere Farbe zugehört. Letzteres merkt man auch, wenn man die Gläser etwas aneinander zu pressen versucht; jede Änderung der Luftdicke durch Verbiegung der Gläser zeigt sich als sehr merkliche Änderung der Farbe[1]).

[1]) Legt man eine Konvexlinse in eine ihr genau gleiche Hohlform, so sieht man überall gleiche Farbe auf ihrer ganzen Fläche. Dies ist das Mittel der praktischen Optik, einmal ausprobierte — etwa gegen Kugelfehler (59) korrigierte — Linsenformen in beliebiger Zahl genau gleich herzustellen. Man ändert die neue Linse durch Nachschleifen solange ab, bis sie der Farbenprobe in der einer guten Linse entsprechenden Hohlform genügt.

Um die Farben gut zu sehen, muß eine weiße Fläche (etwa eine weiße Wolke) gespiegelt in der Luftschicht betrachtet werden. Man findet längs eines Radius vom Mittelpunkte aus nirgends genau gleiche Farbe; jede (nicht zu große) Luftdicke hat ihre besondere Farbe; allerdings reichen die gebräuchlichen Farbenbezeichnungen nicht aus, weder um die zum Teil wenig verschiedenen Farbentönungen anzugeben, noch auch um ihre ganze Pracht zum Ausdruck zu bringen.

Der Mittelpunkt ist tiefschwarz; von da ab zeigen sich (mit Überspringung vieler zwischenliegender Farbentönungen) die in Tab. 39 verzeichneten Farben. Newton hat dieselben bereits in Ordnungen geteilt, wie in der Tabelle angegeben.

Tab. 39. **Farben dünner Blättchen.**
(Newtons Farben).

Farbe	Ordnung	Farbe	Ordnung
Schwarz	1. Ordnung	blau	3. Ord.
blaugrau	1. Ordnung	grellgrün	3. Ord.
fast weiß	1. Ordnung	gelb	3. Ord.
gelb	1. Ordnung	rosa	
purpur		grün	4. Ord.
violett	2. Ordnung	rot	4. Ord.
blau	2. Ordnung	grün	5. Ord.
weißlich grün	2. Ordnung	rot	5. Ord.
gelb	2. Ordnung	blaßgrün	6. Ord.
rot	2. Ordnung	blaßrot	6. Ord.
purpur			
sehr weißlich grün	7. Ord.		
sehr weißlich rot	7. Ord.		
weiß			

Dieselben Farbenfolgen sieht man auch an Seifenblasen. Dies zeigt, daß nichts die Erscheinungen verursachen kann als nur die Einwirkung einer dünnen Mediumsschicht auf das Licht. Die Gläser des Farbenglases, welche die hier wirksame dünne Luftschicht einschließen, haben mit ihren äußeren Grenzflächen keinen wesentlichen Einfluß auf die Erscheinung; Reflexionen an diesen Grenzflächen stören nur. Das Farbenglas hat den Vorteil, daß man aus dem bekannten Krümmungsradius der unteren Linsenfläche und dem Radius irgendeines der Ringe sogleich die Dicke der Luftschicht berechnen kann, der die Farbe des Ringes zugehört.

124. Erscheinungen bei einfarbigem Licht. — Um das Zustandekommen der bei weißem Licht beobachteten Farben zu verstehen, muß man von einfarbigem (monochromatischem) Lichte ausgehen, da das weiße Licht aus den einfarbigen Lichtern zusammengesetzt ist (48).

Bei einfarbigem Licht zeigt sich nur eine Aufeinanderfolge von hellen und dunklen Ringen, welche die auch hier dunkle (schwarze) Mitte umgeben. Helligkeit und Dunkelheit gehen stets allmählich ineinander über. Zur Beobachtung kann man das Licht einer Natriumflamme (77, 82) benutzen oder auch weißes Licht

mit Einschaltung eines möglichst monochromatischen Farbglases, das man einfach dicht ans Auge halten kann.

Nachmessung zeigt, daß der Abstand je zweier benachbarter dunkler (oder heller) Ringe überall demselben Dickenunterschied der Luftschicht entspricht. Eine Änderung der Luftdicke um die Hälfte dieses Unterschiedes läßt dunkel in hell und hell in dunkel übergehen, und dies bestätigt sich auch, wenn man die Dickenänderung an einer und derselben Stelle der Gläser durch Abstandsänderung derselben hervorbringt.

125. Erklärung der Ringe. — Widerspruchsfreie Erklärung zunächst der hellen und dunklen Ringe im einfarbigen Licht ergibt sich, wenn man Wellennatur des Lichtes annimmt und Interferenzen der an den beiden Grenzflächen der Schicht reflektierten, zusammen ins Auge kommenden Strahlen betrachtet (Thomas Young 1802). Andere Erklärungsversuche haben gegenüber zunehmender Tatsachenkenntnis zunehmend versagt.

Es sei (Abb. 44) S S eine Schicht von der Dicke D, die wir hier optisch dichter annehmen wollen als ihre obere und untere Umgebung, wie es z. B. für eine Seifenhaut in Luft der Fall wäre. 1 und 2 seien zwei Strahlen, die, von gemeinsamer — hier fern angenommener — Lichtquelle kommend, die Schicht erreichen. Sie haben bei a und b gleiche Zustände, da sie der gemeinsamen Wellenfläche a b angehören (vgl. 40 und Abb. 18). Von dem einen Strahl, 1, kommt der an der oberen Grenzfläche, bei c reflektierte Anteil in ein bei A befindliches Auge; von dem anderen, 2, der auf dem Umweg b d c zweimal durch die Schicht gegangene Anteil. Beide Strahlen treffen bei c zusammen. Sind hier ihre Zustände entgegengesetzt, so vernichten sie einander so nahezu als ihre Intensitäten nahe gleich sind, was zu erwarten ist, weil beide Strahlen nahe gleiche Schwächung bei der einmaligen Reflexion erlitten haben[1]). Es wird also überhaupt kein Licht von c nach A hin laufen, und der Punkt c muß daher dem bei A befindlichen Auge dunkel erscheinen. Es muß dann sogar die ganze, überall gleich dicke Platte, in der Richtung 1 c bestrahlt, kein Licht reflektieren, während doch ihre Grenzflächen gut reflexionsfähig sind; denn es gilt für alle Punkte ihrer oberen Fläche beim gleichen Einfallswinkel dasselbe, wie für c. Verändert

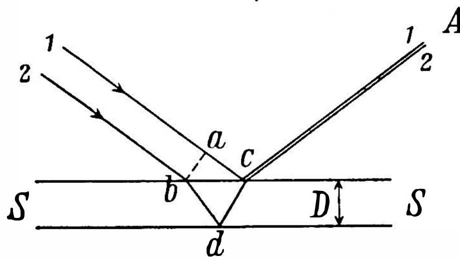


Abb. 44. Interferenz an Platte im reflektierten Licht.

[1]) Die tatsächliche genaue Gleichheit der Intensitäten, entsprechend der vollständigen Auslöschung an allen Stellen mit dem Gangunterschied einer ungeraden Zahl von halben Wellenlängen ergibt sich, wenn man alle bei c austretenden Strahlen berücksichtigt. Es gehört dazu noch eine Reihe von (in Abb. 44 nicht gezeichneten) Strahlen, die, links von b in gleichen Zwischenräumen (wie b c) auffallend, nach mehrfachen Hin- und Her-Reflexionen in der Platte ebenfalls bei c austreten. Sie ändern, zum Strahl 2 hinzugefügt, nichts an der Entgegengesetztheit der bei c nach A hin zusammenkommenden Zustände, machen aber die zusammenkommenden Intensitäten genau gleich. Die in der Ringerscheinung zu beobachtenden vollständigen Vernichtungen zeigen das Zutreffen der Rechnung mit den mehrfachen Reflexionen, und dies ergibt auch einen der Nachweise für das Zutreffen von Fresnels Gleichungen für die reflektierten und durchgelassenen Intensitäten (176), die für die Rechnung maßgebend sind.

man jedoch die Dicke der Platte, so daß der Gesamtumweg des einen Strahles (2) gegen den anderen (1), d. i. in Wellenlängenzahlen $\overline{bdc}/\lambda_2 - \overline{ac}/\lambda_1$, um eine halbe Wellenlänge verändert wird, so muß an Stelle der Dunkelheit Helligkeit treten, weil dann bei c an Stelle der entgegengesetzten Zustände gleiche Zustände zusammenkommen, die einander verstärken. Die Umwegberechnung in Wellenzahlen (122) muß dabei die Verschiedenheit der Wellenlängen außerhalb und innerhalb der Platte — λ_1 und λ_2 — berücksichtigen; so ist im Beispielsfalle der Abbildung der Umweg gegeben durch $\overline{bdc}/\lambda_2 - \overline{ac}/\lambda_1$.

Am einfachsten ist die Umwegberechnung bei senkrechtem Einfall der Strahlen; es ist dann der Umweg stets gleich der doppelten Schichtdicke, 2D, und es muß daher jede Veränderung der Schichtdicke um $^1/_4$ der in der Schicht bestehenden Wellenlänge dunkel in hell (hell in dunkel) verwandeln. Dies ist die Erklärung der hellen und dunklen Ringe bei Newtons Farbenglas im einfarbigen Lichte.

126. Fraglich ist nur noch die Dunkelheit der Mitte, wo die Schichtdicke Null, also auch der Umweg Null ist und wo daher immer nur gleiche Zustände zusammenkämen und also Helligkeit zu erwarten wäre. Die tatsächliche Dunkelheit zeigt, daß außer den Umwegen noch ein anderer Umstand die bei c zusammenkommenden Zustände beeinflussen muß. Der Gedanke an Analogie der Ätherwellen mit Wellen in der Materie ließ vermuten, daß dieser Unterschied darin bestehe, daß der Strahl 1 an einem optisch dichteren Medium, der Strahl 2 aber an einem optisch dünneren Medium reflektiert ist und daß die Reflexion am dichteren Medium unter Umkehr des Zustandes vor sich gehe, wie bei Wellen in der Materie (vgl. A 31). Dies hat sich bestätigt, obgleich Äther nicht Materie und optische Dichte nicht Massendichte ist (35). Die Bestätigung liegt nicht nur in den sogleich eingehend zu betrachtenden, beobachteten Besonderheiten der Ringerscheinung, sondern in später zu behandelnder, viel allgemeinerer Zusammenfassung von Eigenschaften der Lichtwellen (176), sowie auch in der eingehenden Untersuchung der langen Ätherwellen mit elektrischen Mitteln (E 431).

Diese Umkehr des Zustandes, welche gleich einem Gangunterschied von einer halben Wellenlänge wirkt und die nur beim einen der beiden Strahlen eintritt, macht es, daß sie mit entgegengesetzten Zuständen gerade dann zusammenkommen, daß also keine Reflexion stattfindet, wenn die Schichtdicke Null oder sehr klein gegenüber der Wellenlänge ist.

Man sieht dementsprechend einen tiefschwarzen Fleck an der dünnsten Stelle einer Seifenblase, die genügend lange ruhig dem allmählichen Dünnerwerden durch Abfließen ihres Wandinhalts überlassen war. Besteht die Schicht aus Luft, umgrenzt von optisch dichterem Glas, wie bei Newtons Farbenglas, so ist es der unten reflektierte Strahl, der die Zustandsumkehr erleidet, was wieder dieselbe, eine schwarze Mitte ergebende Wirkung hat. In diesem Falle des Farbenglases kann in der Mitte auch eine Berührung von Glas an Glas ohne alle dazwischenliegende Luftschicht durch einigen Druck hervorgebracht werden, und dann ist es selbstverständlich, daß dort kein Licht reflektiert wird, also Schwärze erscheint, weil dann dort überhaupt keine Grenzfläche verschiedener Stoffe vorhanden ist. Jedoch sind die der Berührungsstelle rings benachbarten, sehr dünnen Luftschichten ebenso schwarz, und die Schwärze geht weiter außen nur ganz allmählich in Helligkeit über. Dies zeigt — sowie auch der schwarze Fleck der

Seifenblase —, daß auch beim tatsächlichen Vorhandensein von Grenzflächen die Reflexion in der sehr dünnen Schicht fehlt, wie es der Annahme der Zustandsumkehr bei *einer* der beiden verschiedenartigen Reflexionen entspricht.

Setzt man das Farbenglas aus zwei Gläsern von verschiedenen Brechungsexponenten zusammen und ersetzt man die Luft durch eine Flüssigkeit von dazwischenliegenden Brechungsexponenten, so wird die Mitte hell. Hier wirkt also die dünne Schicht reflektierend, wie es aber auch die Grenzfläche der beiden verschiedenen Gläser ohne Zwischenschicht tun würde. Dies stimmt wieder mit der angenommenen Zustandsumkehr überein, die hier bei *beiden* Strahlen fehlt oder — je nach der Reihenfolge der Medien — bei beiden vorhanden ist. Daß es das dichtere Medium ist, an welchem die Umkehr erfolgt, dies ist unzweifelhaft durch die bereits erwähnte Kenntnis der [illegible]gen Ätherwellen nachgewiesen (E 431).

127. *Wellenlängenmessung aus den Ringen.* — Beobachtet man die Ringe mit Licht verschiedener Farbe, so bemerkt man, daß die Abstände der Ringe von der Farbe abhängen. Bei rotem Licht sind die Ringe am weitesten, bei violettem stehen sie am engsten; die anderen Farben liegen in spektraler Reihenfolge dazwischen. Von Violett bis Rot gehen die Ringabstände bzw. Durchmesser etwa auf das Doppelte.

Ist die bereits vorgebrachte Erklärung der Erscheinung aus der Wellennatur des Lichtes richtig, so sind damit auch die Wellenlängen der verschiedenfarbigen Lichter ermittelbar: Die Luftschicht, welche bei senkrechter Reflexion den ersten dunklen Ring gibt, ist ½ Wellenlänge dick, beim 2. Ring eine ganze Wellenlänge, beim dritten $^3/_2$ Wellenlänge usw. Daraus ergibt sich erstens die *Kleinheit der Wellenlängen allen sichtbaren Lichtes*, da die Ringe nur bei sehr engem Luftzwischenraum, wenn eine sehr flache Linse auf Planglas liegt, leicht meßbare Durchmesser haben, andernfalls, bei einigermaßen gewölbter Linse, mikroskopisch klein ausfallen. Zweitens ist ersichtlich, daß die Wellenlänge bei Rot am größten, bei Violett am kleinsten ist, und zwar bei Rot etwa doppelt so groß als bei Violett. Schon Newton gibt die Luftdicken an, aus welchen die Wellenlänge des gelben Lichtes zu 0·00057 mm folgt. Bei äußerstem rotem Licht ist sie rund 0·0008 mm, bei violettem 0·0004 mm.

Bringt man Wasser statt der Luft in Newtons Farbenglas, so ziehen sich die Ringe zusammen. Es zeigt dies, daß Schichtdicken gleichen Gangunterschiedes, also auch die Wellenlängen, in Wasser kleiner sind als in Luft. Die Wellenlängen sind aber, als Wege gleicher Zeit, den Lichtgeschwindigkeiten proportional. Daher zeigt dieser Versuch, daß die Lichtgeschwindigkeit in Wasser kleiner ist als in Luft, und zwar ist dies ganz in dem Maße der Fall, wie es Huygens' Erklärung der Brechung entspricht (41). Es war dies die erste, später durch die unmittelbare Messung der Lichtgeschwindigkeit in Wasser (42) bestätigte Probe auf jene Erklärung der Brechung, und die Bestätigung durch die unmittelbare Messung ist, wie man sieht, zugleich eine Bestätigung der Erklärung der Ringe aus Welleninterferenz.

128. Nun ist auch die *Erklärung der Farben im weißen Lichte* leicht. Es wird hier an jeder Stelle die Übereinanderlagerung dessen erscheinen, was die einzelnen Farben, die das weiße Licht zusammensetzen, für sich allein gäben. Man erhält somit das Spektrum jeder einzelnen der Färbungen, welche den

verschiedenen Luftdicken zugehören (Tab. 39), wenn man für die betreffende Luftdicke jede Spektralfarbe in derjenigen Intensität im Spektrum aufträgt, in welcher sie allein erscheinen würde. Dies ist in Abb. 45 ausgeführt. Die Luftdicken sind unten angegeben, sie wachsen von 0 bis wenig über 0·002 mm, und es ist eine eben begrenzte, keilförmige Schicht angenommen. Darüber sind die Erscheinungen aufgetragen, welche die Schicht in den verschiedenen vertikal angeordneten Farben des Spektrums zeigen würde, nämlich die abwechselnden Dunkelheiten und Helligkeiten, ausgehend von der für alle Farben gemeinsamen Dunkelheit bei der Dicke Null. Zu jeder Farbe (Wellenlänge) gehört ein horizontaler Streifen (punktiert) der Gesamtdarstellung. Man sieht, daß im äußersten Rot die Dunkelheiten etwa doppelt so große Abstände haben, als im äußersten Violett, wie es der direkten Beobachtung entspricht (127); die zwischenliegenden

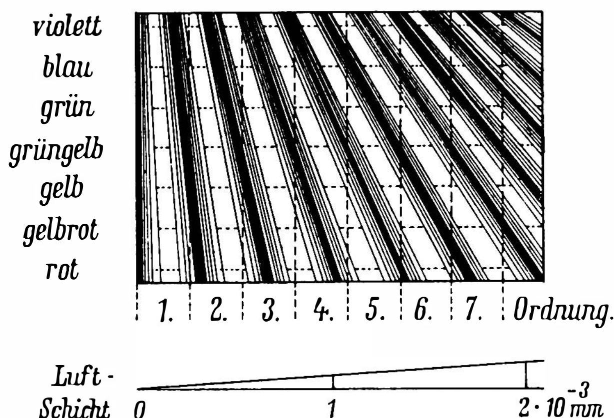


Abb. 45. Luftschicht, Farben dünner Schichten.

Farben sind der Einfachheit halber so verteilt, daß die Gesamtverteilung der Dunkelheiten die in der Zeichnung ersichtlichen, geradlinigen schrägen Streifen gibt[1]). Will man nun das Spektrum der Farbe haben, welche eine Luftschicht von gegebener Dicke im reflektierten weißen Lichte zeigt, so errichtet man bei der betreffenden Dicke eine senkrechte Linie (deren mehrere in der Abb. 45 gestrichelt zu sehen sind); ihr Lauf durch die einzelnen Farben gibt für jede derselben die Intensität an, mit welcher sie vertreten sein wird, womit ihr Spektrum vollständig gegeben ist. Die über der Dicke Null errichtete Senkrechte, zusammenfallend mit dem linken Rand der Zeichnung, zeigt nur Schwarz; dies ist der schwarze Fleck in der Mitte des Farbenglases. Geht man zu wachsenden Dicken, so erscheint zuerst das blaue Ende des Spektrums, zusammen mit geringeren Intensitäten der anderen Farben und fast ohne Rot; dies macht im Gemisch den Eindruck des „Blaugrau" (Tab. 39), das dann weiter in „fast Weiß" übergeht, da dann alle Farben fast in gleicher, voller Helligkeit vertreten sind. Bei noch größerer Dicke verschwindet das Violett und Blau, und der Rest gibt gemischt „Gelb" für das Auge (vgl. 53). Es folgt dann eine Dicke, für welche

[1]) D. h. es sind die links verzeichneten Farben proportional ihren Wellenlängen vertikal verteilt (wie es in einem Beugungsspektrum der Fall ist, vgl. 155, 157).

die erste in der Abbildung gezogene gestrichelte Vertikale gilt; man sieht, daß jetzt die Mitte des Spektrums verdunkelt ist und nur die beiden Enden erhellt sind, was für das Auge „Purpur" gibt (53). Damit sind die Farben 1. Ordnung durchlaufen; das Purpur bildet die Grenze nach der 2. Ordnung, die man — so wie auch die folgenden Ordnungen — in gleicher Weise aus der Abb. 45 studieren kann. Die Grenzen der einzelnen Ordnungen, entsprechend den gestrichelten Senkrechten der Abb. 45, liegen jeweils dort, wo die Mitte des Spektrums, das helle Gelb, verdunkelt ist. Je höher die Ordnung, desto größer ist die Gesamtzahl der dunkelen Stellen und desto schmäler sind sie. Über die 7. Ordnung hinaus merkt das Auge nichts mehr vom Fehlen der gleichmäßig über das Spektrum verteilten Stellen im Gemisch; es sieht dann so gut wie reines Weiß, ebenso wie auch das Sonnenlicht weiß erscheint, obgleich sehr viele schmale Spektralstellen — in Gestalt von Fraunhofers Linien — in demselben fehlen. Es liegt nur am Auge, daß mehr als 7 Farbenordnungen nicht erscheinen oder — was dasselbe ist — daß Schichten von mehr als $^7/_2$ Wellenlängen (bei Luft 0·002 mm) Dicke völlig weiß gesehen werden (vgl. 53).

129. Dicke Schichten; kohärentes Licht. — Für einfarbiges Licht ist nach dem bisher Überlegten keine Dickengrenze für das Auftreten sichtbarer Interferenzen zu erwarten; es würde für jede Plattendicke, die im ganzen ein ungerades Vielfaches der halben Wellenlänge als Gangunterschied ergibt, Auslöschung zu erwarten sein, wie groß auch dieses Vielfache sei, und Helligkeit für jedes geradzahlige Vielfache.

Dem entspricht auch die Beobachtung insofern, als die Ringe des Farbenglases bei einfarbigem Licht viel weiter hinaus bis zu größeren Luftdicken zu sehen sind als mit weißem Licht, wo nur 7 Ringe erscheinen. Man kann aber auch mit einfarbigem Licht die Erscheinung nicht bis zu beliebig großen Dicken verfolgen. Der Grund hiervon liegt in der Nichterfüllung zweier Bedingungen, das verfügbare Licht betreffend, die bei den bisherigen Überlegungen wesentlich waren. Es war gedacht, daß vollkommen einheitliche Wellenlängen, ohne Beimischung kürzerer oder längerer Wellen, zu haben seien — vollkommen monochromatisches Licht (49). Außerdem waren die Wellenzüge vollkommen ununterbrochen gedacht, bestehend aus lückenlos aneinander schließenden, einander vollkommen gleichen Wellen, was als vollkommene „Kohärenz" des Lichtes bezeichnet wird.

Beide Bedingungen werden durch keine Lichtquelle erfüllt.

Besonders aufschlußreich waren hierzu Versuche mit dem gelben Lichte der Natriumflamme. Dieses Licht ist monochromatischer als das irgend eines Farbglases; es hat nur die eine Hauptserienlinie des Natriums in seinem Spektrum (82). Versucht man mit diesem Licht zu Interferenzen bei dicken Luftschichten vorzudringen, so findet man bei wachsender Schichtdicke, ausgehend von der Dicke Null, etwa 400 Wechsel von Helligkeit und Dunkelheit zählbar; danach tritt aber Verwaschung der Erscheinung ein, und bei einer Dicke, die dem 500sten Wechsel entspräche (0·147 mm), sind die Ringe verschwunden. Steigert man die Dicke weiter, so tritt bei der doppelten Dicke (die dem 1000sten Wechsel entspräche) wieder deutliche Folge von Hell und Dunkel auf, bis dann wieder Verwaschung erfolgt, und dies Verschwinden und Wiederauftreten der Erscheinung kann bei weiter gesteigerter Dicke einige Male mit abnehmender

Deutlichkeit wiederholt beobachtet werden, bis man zuletzt zu Dicken kommt, die gar nichts mehr zeigen.

Das periodische Verschwinden und Wiederauftreten der Erscheinung erklärt sich aus der Doppelheit der gelben Natriumlinie (82). Das dichte Beieinanderstehen der beiden Linien bedeutet, daß hier zwei wenig verschiedene Wellenlängen gleichzeitig vorhanden sind. Sind 1000 Wellen der einen Linie zusammen so lang als 1001 Wellen der anderen, dann fällt der 1000te dunkle Ring der einen Linie zusammen mit dem 1001ten der anderen, wodurch sie einander nicht stören, sondern verstärken; dazwischen aber, beim 500sten Ring, fällt die Dunkelheit der einen Linie mit Helligkeit der anderen zusammen, und dies gibt die Verwaschenheit und läßt die Ringe verschwinden, wie es beobachtet wurde. Danach müßte der Wellenlängenunterschied der beiden Linien $^1/_{1000}$ der Wellenlänge sein, was auch der periodischen Wiederholung des Erscheinens und Verschwindens entspräche. Dies stimmt aber mit den in ganz anderer Weise — aus den Beugungsspektren (152) — gemessenen Wellenlängen der beiden Natriumlinien, 0·0005890 mm und 0·0005896 mm, vollkommen überein, und dies bedeutet eine gute Sicherung der Kenntnis von den Lichtwellen und deren Interferenz.

Das schließliche Versagen der Erscheinung bei den ganz großen Dicken wird durch die sehr merkliche Breite auch jeder einzelnen der beiden Natriumlinien erklärt. Jede derselben enthält eine Reihe benachbarter Wellenlängen, und wie wenig diese auch von einander verschieden sein mögen, so müssen doch die bei großen Dicken auseinanderfallenden Helligkeiten und Dunkelheiten der einzelnen Wellenlängen Verwaschung der Erscheinung ergeben.

Dieser Mangel an vollkommener Einheitlichkeit der Wellenlängen trifft mehr oder weniger für jede verfügbare Lichtart zu. Das ausgesonderte Licht einiger besonders schmaler Spektrallinien des Quecksilbers oder des Kadmiums erlaubte die Zählung ununterbrochener Folgen von Helligkeiten und Dunkelheiten bis zu Luftdicken sogar von der Größenordnung eines Meters. Es sind damit auch *kohärente Lichtwellenzüge von solcher Länge* nachgewiesen. Denn alles Zutreffen der Schlüsse auf Verstärkung oder Auslöschung bei Interferenzerscheinungen bei bestimmtem Gangunterschied (122) beruht auf vollkommener Kohärenz der Wellenzüge in der ganzen Länge des Gangunterschiedes.

Zur Aussendung kohärenter Wellenzüge ist ungestörtes Schwingen der aussendenden Atome erforderlich. Die Zeit zur Aussendung der in 1 m Strahllänge enthaltenen rund 2 Millionen Wellen ist allerdings nur $(^1/_3)\cdot 10^{-8}$ sek, und so lange kann ein aussendendes Atom im Gaszustande wohl auch ungestört bleiben, insofern die Zwischenzeit der Zusammenstöße mit anderen Atomen in nicht zu dichtem Gase und bei nicht zu hoher Temperatur länger ist. Störung der Atome bei der Aussendung würde, ebenso wie das quantenweise Arbeiten der Atome (vgl. 115), Unterbrechung der Kohärenz, somit Einschränkung der Kohärenzlängen der Wellenzüge erwarten lassen. In welchem Maße solche Einschränkung beim Zusammenwirken vieler Atome in der Lichtquelle (165) wirklich eintritt, dies zu untersuchen würde äußerst monochromatisches Licht verlangen, das die Interferenzen hoher Gangunterschiede nicht schon wegen Vorhandenseins verschiedener Wellenlängen in der oben erläuterten Weise verschwinden läßt.

Interferenzen an Platten im durchgehenden Licht.

130. Nicht nur im reflektierten Licht, wie bisher betrachtet, sondern auch im durchgehenden Licht sind an Newtons Farbenglas Interferenzen zu erwarten.

Abb. 46 zeigt die beiden Strahlen 1 und 2, die hier zusammenwirken[1]). Es sind dies dieselben, von ferner Lichtquelle kommenden Strahlen, die wir schon in Abb. 44 betrachteten; sie kommen auch hier wieder bei c zusammen, nur daß jetzt von c ab nicht ihr nach der Ursprungsseite zurückgehender Anteil zu betrachten ist, sondern der durchgehende Anteil ceA. Man sieht, daß der Weg ceA für beide Strahlen der gleiche ist; es kommt daher nur auf den Wegunterschied bis c und auf die Zustandsänderungen bei den Reflexionen an. Es ist aber auch der Wegunterschied bis c der gleiche, wie im Falle des reflektierten Lichtes (vgl. Abb. 44), nämlich — bei senkrechtem Einfall — doppelte Plattendicke; nur in Bezug auf die Reflexionen liegt ein Unterschied vor: es fehlt die Zustandsumkehr, die im reflektierten Licht die schwarze Mitte von Newtons Farbenglas gab (126). Die in Betracht kommenden Reflexionen, bei d und c, betreffen nämlich hier beide nur den Strahl 2, und ist die Platte optisch dichter als ihre Umgebung, so findet überhaupt keine Umkehr, weder bei d noch bei c statt, ist sie aber optisch dünner, so finden zwar bei d und bei c die Umkehrungen statt, sie heben aber einander auf. Somit bleibt hier die halbe Wellenlänge im Gangunterschied weg, die im reflektierten Lichte die Mitte, bei welcher kein Umweg vorhanden ist, dunkel machte. Die Mitte muß also hier hell sein mit daran anschließendem Wechsel von Dunkelheit und Helligkeit in gleichen Abständen wie im reflektierten Lichte, und dies gilt für jede Farbe einzeln mit den ihrer Wellenlänge entsprechenden Ringdurchmessern.

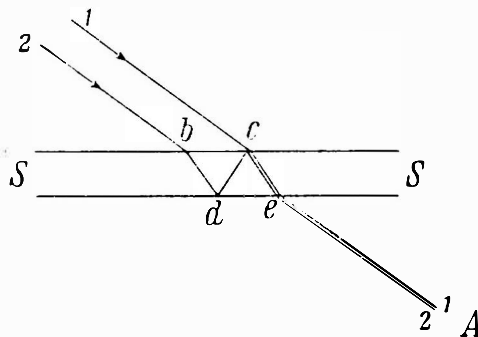


Abb. 46.
Interferenz an Platte im durchgehenden Licht.

Bei weißem Licht werden dementsprechend an jeder Stelle gerade diejenigen einfarbigen Bestandteile im durchgehenden Lichte fehlen, die im reflektierten Lichte vorhanden sind, und umgekehrt; d. h. aber: es werden im durchgehenden Lichte überall Farbenmischungen erscheinen, die denen des reflektierten Lichtes komplementär sind (53).

Es ist auch von vornherein zu sagen, daß reflektiertes und durchgegangenes Licht zusammen an jeder Stelle wieder das volle auffallende Licht geben müssen; denn Verlust von Licht-Energie findet hier, wie überhaupt bei Interferenzen, nirgends statt (vgl. 162 u. f.).

Die Spektren des durchgegangenen Lichtes aller Ordnungen sind mittels Abb. 45 leicht zu erhalten, wenn man auch dort dunkel mit hell vertauscht.

Nur ein besonderer Unterschied ist beim durchgehenden Licht noch gegenüber

[1]) Es wird hier wieder abgesehen von mehrfach in der Platte hin und her reflektierten Strahlen, die wegen geringer Intensität nicht viel beitragen (vgl. Note zu 125).

dem reflektierten zu bemerken: die Dunkelheiten der Auslöschungen können hier nirgends vollständig sein. Denn wo entgegengesetzte Zustände zusammenkommen sind sie doch nicht entgegengesetzt gleich, weil die beiden interferierenden Strahlen hier sehr verschiedene Intensität haben, indem der eine einfach durchgegangen, der andere aber zweimal reflektiert, also sehr geschwächt ist. Im reflektierten Licht wirken dagegen zwei gleich intensive Strahlen zusammen (125). Daher sind die im durchgehenden Lichte erscheinenden Farben von einer Menge überschüssigen Weiß überdeckt und matt im Vergleich zu den gesättigten Färbungen des reflektierten Lichtes.

Die später zu behandelnden Interferenzerscheinungen an Kristallen (196) bieten beide Färbungen, die des durchgegangenen wie des reflektierten Lichtes, in voller Sättigung, d. i. mit vollen Auslöschungen im Spektrum.

Fresnels Spiegelversuch.

131. Ein reiner Interferenzversuch. — Dieser Interferenzversuch entstand aus der Absicht, einen noch unmittelbareren, Einwänden möglichst ganz entzogenen Nachweis der Wellennatur des Lichtes — wenn solche wirklich besteht — zu finden, als die Farben der dünnen Blättchen (und die von Fresnel schon studierten Beugungserscheinungen, 140 u. f.) ihn boten. Es sollte das ein reiner Interferenzversuch sein, und er wurde es auch. Sollte jemand heute oder künftig an den Wellen des Lichtes zweifeln, so wird er immer vor allem an die Ergebnisse dieses Versuches sich halten müssen[1]).

Die beiden interferierenden Strahlen sollten einzig und allein einen Wegunterschied aufweisen, ohne sonst irgendwelche sie unterscheidende Behandlung erfahren zu haben. Es sollte die auftretende Erscheinung nicht mitbedingt sein durch verschiedenartige Reflexionen der beiden Strahlen oder Reflexion des einen und Nichtreflexion des anderen Strahls, wie es bei den Farben der dünnen Blättchen der Fall ist (oder durch das Hinzutreten der an sich erst zu untersuchenden Beugung), sondern eben nur durch Wegunterschiede.

Die Ausführung erfolgte mittels zweier unter sehr stumpfem Winkel zueinander geneigter, völlig gleicher ebener Spiegel S′D S″, Abb. 47. Damit nur die Reflexion an der vorderen Glasseite in Betracht kommt, sind die Spiegel hinten geschwärzt, wodurch das ins Glas eindringende Licht durch Absorption beseitigt ist. Der leuchtende Punkt oder die parallel der Spiegelkante D gestellte leuchtende Linie P, z. B. ein glühender Platindraht, sendet sein Licht auf die beiden Spiegel, das von ihnen reflektiert so weiterläuft, als käme es von den beiden Lichtquellen R und L. Die Abbildung zeigt die von diesen beiden Punkten ausgehenden Kugelwellen mit ihrer Aufeinanderfolge entgegengesetzter Zustände (in gleicher Darstellung wie in Abb. 42). Überall wo gleiche Zustände zusammentreffen, d. h. überall wo gleichlange Wege von P über die beiden Spiegel oder auch in gerader Linie von R und L hinführen, oder wo der Wegunterschied ein gerades Vielfaches der halben Wellenlänge ist, wird Helligkeit zu erwarten sein. Wohin aber der Wegunterschied ein ungerades Vielfaches

[1]) Man findet die große Wichtigkeit reiner Versuche schon in der Einleitung und am Beispiel von Galileis Untersuchungen hervorgehoben (Bd. I, Einl. 6, M 118); sie zeigt sich ebenso hier, wie in den vielen anderen Beispielen bei den großen Fortschritten der Naturforschung.

der halben Wellenlänge ist, wird Dunkelheit zu erwarten sein. Helligkeit wird also dauernd längs der Mittellinie DB und rechts wie links davon längs B″ und b″ und weiter in gleichen Abständen zu erwarten sein, und dazwischen, bei B′ und b′ usw., Dunkelheit. Dies bestätigt sich auch vollkommen, wenn man einen Schirm senkrecht zur Mittellinie DB aufstellt; man sieht bei monochro-

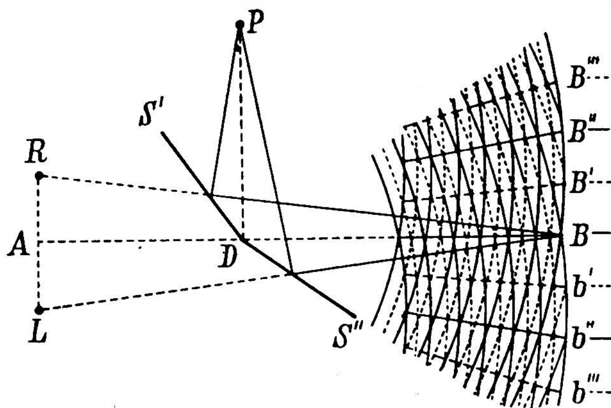


Abb. 47. Fresnelsche Spiegel.

matischem Licht äquidistante helle und dunkle Streifen auf ihm. Im weißen Licht entstehen, entsprechend der Wellenlängenverschiedenheit von dessen verschiedenfarbigen Bestandteilen, farbige Streifen; nur die Mitte ist weiß, weil dort alle Wellenlängen mit gleicher Phase zusammenkommen; rechts und links von der Mitte sind die Farbenfolgen einander gleich.

Es sei bemerkt, daß alle die Linien B und b Hyperbeln sind mit den Brennpunkten R und L, was aus geometrischer Kenntnis leicht einzusehen ist, da es für alle Punkte dieser Linien auf Abstandsdifferenzen von R und L ankommt.

132. Fresnelsche Lupe. — Fresnel benutzte eine matte Glastafel als Schirm zur Beobachtung und besah dieselbe von der anderen Seite mit einer Lupe. Bald fand er, daß die Glastafel auch weggelassen und die Lupe allein benutzt werden kann; die Streifenerscheinung tritt dann sogar lichtstärker und reiner auf. Man sieht so mit „Fresnelscher Lupe" die Lichtverteilung im Raume an der anvisierten Stelle in der Brennebene der Lupe, wo dieselbe auch ein Fadenkreuz oder zu Meßzwecken einen mit Mikrometerschraube verschiebbaren Faden tragen kann.

Die Streifen werden in leichtverständlicher Weise um so breiter, je näher der Winkel der beiden Spiegel 180° ist. Ist dieser Winkel viel kleiner als 180°, so werden die Streifen wegen der Kleinheit der Lichtwellenlängen unmerklich. Man kann aus der Streifenbreite in monochromatischem Licht, aus dem Spiegelwinkel und den maßgebenden Abständen die Wellenlänge des Lichtes leicht berechnen[1]), und man findet hier dieselben Wellenlängen wie aus Newtons Ringen (127). Dies mit allen noch eingehender untersuchten Gesetzmäßigkeiten

---

[1]) Die Rechnung ist dieselbe wie bei dem Beugungsversuch mit zwei Spalten (150), wo wir weiter darauf eingehen.

der Spiegel-Interferenzerscheinung war und ist ein besonders überzeugender Nachweis der Wellennatur des Lichtes.

133. Nachweisbare Wellenfronten. — Man kann fragen, warum der Versuch nicht einfach mit zwei nebeneinander gestellten Lichtquellen L und R, etwa zwei glühenden Platindrähten, an Stelle der Spiegel mit der Quelle P ausführbar ist? Es entspräche solche Ausführung allerdings unmittelbar dem Grundgedanken des Versuchs; sie muß aber ergebnislos sich zeigen, weil es unmöglich ist, zwei voneinander unabhängige Lichtquellen zu haben, die stets in übereinstimmenden Phasen emittierten. Letzteres ist aber Grundbedingung dafür, daß bei gleichen Wegen von L und R gleiche Phasen zusammenkommen. Jede Lichtquelle von merklicher Intensität besteht aus einer sehr großen Zahl von leuchtenden Atomgruppen, die in stets wechselnden Phasen emittieren. Wie sehr aber auch bei den verschiedenen Teilen einer und derselben Lichtquelle P die Phasen immer wieder neu erregter und einsetzender Emissionen (115) wechseln mögen, so gelangt doch die Emission dieser Quelle auf beide Spiegel, wonach die Wirkung dem Vorhandensein zweier stets gleichphasiger Lichtquellen L und R gleichkommt.

Eben der positive Ausfall des Versuchs mit dem Platindraht als Lichtquelle zeigt, daß von den einzelnen Punkten eines solchen glühenden Körpers genügend breite, zusammenhängende Wellenfronten ausgehen, um beide Spiegel zu treffen und daß diese Fronten zu so weit kohärenten Wellenzügen gehören als es der Anzahl der sichtbaren Streifen entspricht. Noch breitere Wellenfronten betrachten wir später (161).

Studien über Lichtgeschwindigkeit und Äther mittels Interferenz.

Viele Interferenzversuche sind seit Fresnel mit steigender Verfeinerung ausgeführt worden; sie haben die Überzeugung von der Wellennatur des Lichtes nur befestigt. Hier bringen wir in Auswahl einige charakteristische Versuchsweisen, die auch besondere Auskünfte über den Äther gegeben haben.

134. Der Interferenzrefraktor. — Er hat zum ersten Male den Gedanken verwirklicht, zwei zur Interferenz bestimmte Strahlen auf längerem Wege weit auseinanderzubringen, so daß leicht an einem derselben beliebige Veränderungen vorgenommen werden können, die den anderen nicht betreffen, um zu sehen, wie das den Gangunterschied beeinflußt.

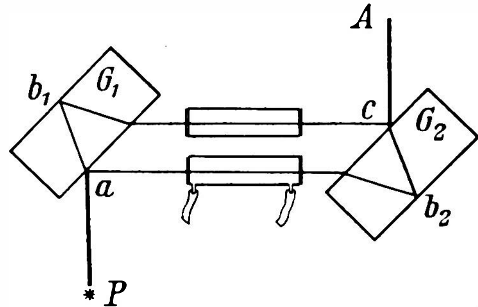


Abb. 48. Interferenz-Refraktor.

Hauptbestandteil sind zwei dicke, planparallele Glasplatten, G_1, G_2, die einander parallel, aber schief zur Verbindungslinie gegenüberstehen, wie es Abb. 48 zeigt. Von der Lichtquelle P nach a hin gehendes Licht kann auf zweierlei Wegen ins beobachtende Auge A gelangen, nämlich über b_1 und über b_2. Bei c kommen die beiden von a an getrennten Strahlen wieder zusammen und somit zur Interferenz. Haben sie keinen Gangunterschied, wie in der Abbildung angenommen, so wird das Auge A den Punkt c hell sehen. Sind die 4 reflektierenden Oberflächen nicht genau einander parallel und wird nicht mit genau parallelem Lichte beobachtet, was im allgemeinen der Fall ist, so entstehen von Punkt zu Punkt wechselnde Gangunterschiede, und es erscheinen daher im monochromatischen Licht, z. B. einer Natriumflamme, helle und dunkle Streifen an der Oberfläche von G_2.

Bringt man an einem der beiden Strahlenwege zwischen den Glasplatten eine Änderung der Lichtgeschwindigkeit hervor, z. B. durch lokale Änderung

der Temperatur der Luft, so ändert sich dort proportional auch die Wellenlänge und infolgedessen die Anzahl der Wellen auf dem gleichen Wege (122). Findet sich dann auf dem einen Wege eine halbe Wellenlänge mehr als auf dem anderen, so ist Helligkeit im Gesichtsfelde mit Dunkelheit vertauscht, was sich als Verschiebung der im Gesichtsfeld befindlichen hellen und dunklen Streifen um eine halbe Streifenbreite zeigt. Erfolgt die Änderung, z. B. der Temperatur, genügend langsam, so kann man die Streifen im Gesichtsfeld allmählich wandern sehen; jeder auf dem einen Wege zugeschalteten oder weggenommenen halben Wellenlänge entspricht Wanderung um eine halbe Streifenbreite, jeder ganzen Wellenlänge um eine ganze Streifenbreite. Man kann so die Anzahl der Wellen zählen, die auf gleichem Wege mehr oder weniger geworden sind, wodurch bei bekannter Wegstrecke auch die Änderung der Wellenlänge und damit auch die der Lichtgeschwindigkeit unmittelbar berechenbar wird. Das Verfahren ist sehr empfindlich. Es genügt z. B., die warme Hand unter einen der beiden Strahlen zu halten, um die Streifen in Bewegung zu setzen. Zwei gleiche, für Längsdurchsicht eingerichtete Röhren, in die beiden Strahlwege gesetzt, wie es die Abb. 48 zeigt, können dazu dienen, die Änderungen der Lichtgeschwindigkeit in Gasen oder Flüssigkeiten bei Temperatur-, Druck- oder Konzentrations-Änderung zu ermitteln. Ebenso können auch Beschaffenheitsänderungen von Gasen oder Flüssigkeiten so ermittelt oder kontrolliert werden.

Von besonderem Interesse war es, so ermittelte Änderungen von Lichtgeschwindigkeiten mit den Änderungen der Brechungsexponenten zu vergleichen, die das Prisma anzeigt. Es müssen, wenn die Vorstellungen über Lichtbrechung (41) und Interferenz richtig sind, beide Änderungen im gleichen Verhältnis stattfinden, und dies ist in der Tat der Fall, was übrigens in einfacher Weise, wenn auch mit geringerer Genauigkeit schon gezeigt war (127). Wir haben diese bestätigende Übereinstimmung schon bei Betrachtung der Brechung hervorgehoben, wo wir auf direkte Messung der Lichtgeschwindigkeit z. B. im Wasser verwiesen (42). Die Messung von Lichtgeschwindigkeiten mit dem Interferenzrefraktor ist zwar nur vergleichend, ist aber viel feiner als direkte, absolute Messungen sein können. Gestützt auf die Bewährtheit der gedachten Vorstellungen kann man mit dem Interferenzrefraktor weiterhin auch Änderungen von Brechungsexponenten messend verfolgen und zwar viel feiner als dies mit dem Prisma möglich wäre.

135. Optische Mitführung. — Eine wesentliche, ebenfalls mit dem Interferenzrefraktor oder ähnlichen Interferenzvorrichtungen zu beantwortende Frage ist die nach der Lichtgeschwindigkeit in bewegten Körpern. Läuft z. B. Licht in strömendem Wasser schneller in der Strömungsrichtung, langsamer gegen dieselbe, relativ zur Erde, als in ruhendem Wasser? Bei Schall in bewegter Luft wäre dies der Fall und zwar in vollem, der Strömungsgeschwindigkeit entsprechendem Maße, weil der Schall seine Wellengeschwindigkeit relativ zur Luft beibehält, auch wenn die Luft bewegt ist. Ist u die Wellengeschwindigkeit in der Luft, v die Luftgeschwindigkeit relativ zum Erdboden, so ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Schalles relativ zum Erdboden $u' = u + v$ (A 23).

Beim Lichte ist dies anders. Zur Ausführung von Versuchen, die dies gezeigt haben, bringt man zwei Rohre im Interferenzapparat an, wie es in Abb. 48

angedeutet ist. Es mögen die Interferenzstreifen den Gangunterschied Null anzeigen, wenn die Flüssigkeit in beiden Röhren ruht. Läßt man dann die Flüssigkeit in einem der Rohre strömen, so tritt eine Verschiebung der Streifen ein, und die Verschiebung ist doppelt so groß, wenn die Flüssigkeit im einen Rohr hin und im anderen zurückströmt. Aus der Größe der Streifenverschiebung ist in der bereits erläuterten Weise (134) die Lichtgeschwindigkeit c' relativ zum Apparat in der bewegten Flüssigkeit herleitbar. Die Versuche sind mit steigender Genauigkeit an mehreren Flüssigkeiten — und auch in bewegtem Glase — durchgeführt. Folgendes ist das Ergebnis:

Ist die Wellengeschwindigkeit des Lichtes im freien Äther c, so ist sie, wie die Brechung lehrt (41, 42), in einem an der Erde ruhenden Körper vom Brechungsexponenten n c/n. Ist der Körper aber bewegt — Geschwindigkeit v gegen Erde —, so ist die Lichtgeschwindigkeit c' gegen Erde in ihm nicht $c/n + v$, wie es nach Analogie mit dem Schall in bewegtem Medium zu erwarten wäre, sondern es ist

$$c' = c/n + (1-1/n^2)v. \qquad 135)$$

Das Licht wird also nicht vollständig mitgeführt vom Körper, sondern es fehlt der Bruchteil $1/n^2$ an vollständiger „optischer Mitführung".

136. Für die Lichtgeschwindigkeit in den kleinen Körpern auf Erden ist nur der Erdäther merklich; keine Mitführung desselben durch bewegte Körper. — Das Ergebnis der Mitführungsversuche, Gl. 135, ist folgendermaßen zu deuten:

An der vollständigen Mitführung der Lichtwellen mit den bewegten Körpern, die $c' = c/n + v$ ergäbe, fehlt der Bruchteil $1/n^2$ der Geschwindigkeit v des Körpers. Dieser fehlende Bruchteil ist demnach um so kleiner je größer der Brechungsexponent n des Mediums ist, und dies zeigt an, daß die Mitführung dieselbe Ursache hat wie die Brechung. Fehlende Brechung ($n = 1$) gäbe gar keine Mitführung (Gl. 135). Die Brechung, d. i. Änderung der Lichtgeschwindigkeit im Medium (41, 42), ist aber Wirkung des Mitschwingens der Mediumsteile, wie früher erläutert und nachgewiesen (88); daher ist auch die Mitführung — die Beeinflussung der Lichtgeschwindigkeit durch Bewegung des Mediums — nur dem Mitschwingen der Mediumsteile zuzuschreiben. Für Beteiligung anderer Ursachen, wie der Bewegung des Eigenäthers des Mediums mit demselben (23, 138, E 405) oder einer Mitführung des Erdäthers, bleibt kein Raum; denn ohne Brechung ($n = 1$) ist — wie bemerkt — auch keine Mitführung vorhanden.

Das Mitschwingen der Teile des bewegten Mediums ist auch durch Rechnung verfolgt, was ganz in der bereits — bei Erklärung der in ruhenden Medien auf c/n verminderten Lichtgeschwindigkeit — auseinandergesetzten Weise geschieht (88), nur daß jetzt noch die Geschwindigkeit v der mitschwingenden Teile mit zu berücksichtigen ist. Die Durchführung der Rechnung gibt vollkommen die Gl. 135. Der Brechungsexponent n gilt dabei für diejenige Farbe (Schwingungszahl), welche ein mit dem Medium bewegter Beobachter wahrnähme, was sinngemäß notwendig ist, weil es sich um Zusammenwirken der Lichtschwingungen mit den Teilen eben des bewegten Mediums handelt. Der kleine Unterschied in der Schwingungszahl und danach auch in n für ruhendes und bewegtes Medium ist nach Dopplers Prinzip (A 89) richtig berechenbar. Besondere Mitführungs-

Messungen mit verschiedenfarbigem Licht haben gezeigt, daß dieser kleine Unterschied tatsächlich maßgebend ist, womit die Erklärung der optischen Mitführung durch das Mitschwingen der Mediumsteile als vollkommen der Wirklichkeit entsprechend gezeigt ist, soweit alle erreichte Genauigkeit geht.

Daß demnach der Eigenäther des Mediums gar nicht merklich wurde, dies darf — wenn die zugrunde gelegte, mit aller gegenwärtigen Kenntnis übereinstimmende Auffassung vom Äther (4, 23, 138) richtig ist — der Geringfügigkeit des Eigenäthers kleiner, irdischer Körper im Vergleich zum Äther der Erde zugeschrieben werden[1]).

Besondere Versuche haben gezeigt, daß der Eigenäther der kleinen irdischen Körper (23, 138) auch in deren Umgebung sich nicht merklich macht. Es wurde der sehr schnell bewegte Umfang eines gleichsinnig rotierenden parallelen Plattenpaares benutzt, in dessen engem Zwischenraum Lichtstrahlen liefen, deren Wellenlängenänderungen durch Interferenz untersuchbar waren, und es war keinerlei Einfluß der Bewegung der Platten auf die Lichtstrahlen nachweisbar. Die Strahlen wurden durch Spiegelungen möglichst längs des Umfanges der Platten in deren Zwischenraum herumgeleitet, und es wurden Interferenzen eines in Drehrichtung und eines gegen die Drehrichtung laufenden Strahles beobachtet. Die Interferenzerscheinung und also auch die Lichtgeschwindigkeit zeigte sich durch die Drehung der Platten nicht merklich beeinflußt, auch nicht wenn die Platten (aus Eisen) stark entgegengesetzt magnetisiert oder elektrisch geladen wurden.

Diese Versuche wurden ursprünglich in der Absicht angestellt, eine Mitführung des Erdäthers (oder eines allgemeinen Äthers) durch bewegte Körper zu erproben; man sieht, daß auch eine solche Mitführung sich nicht zeigte, ebensowenig wie die vorhergehenden Versuche im Inneren des bewegten Wassers oder Glases irgendeine Äthermitführung zeigten.

137. Quer-Mitnahme der Lichtstrahlen in bewegten Körpern. — Bei der nachgewiesenen Mitführung des Lichtes in Strahlrichtung durch das Mitschwingen der Teile eines bewegten Mediums ist es zu erwarten, daß auch quer zum Strahl die gleiche Mitführung stattfinden wird, nämlich mit dem Bruchteil $(1-1/n^2)$ der Mediumsgeschwindigkeit. Dies ist geprüft durch einen eigentümlichen Versuch, die Aberration (24) mit wassergefülltem Fernrohr zu messen. Die Messung ergab den gleichen Aberrationswinkel wie mit luftgefülltem Fernrohr, was — wie eine einfache Rechnung mit Berücksichtigung der Lichtbrechung beim Eintritt ins Wasser zeigt —, nur bei Stattfinden dieser Quer-Mitführung zutreffen kann. Ohne die Mitführung würde die Aberration wegen der verringerten Lichtgeschwindigkeit im Wasser vergrößert sein müssen.

Während also im freien Äther das Licht quer zum Strahl nur als bewegte Masse sich verhält, unabhängig von Querbewegungen des Äthers (24, 26), findet in Materie die Mitführung der Lichtwellen quer wie längs in jenem, dem Mitschwingen der Mediumsteile entsprechenden Betrage statt. Eine derartige Mitführung durch die mitschwingenden, bewegten Teile ist auch unmittel-

[1]) Wo der Äther des kleinen Körpers allein wirken kann — wie bei Bewegung des Körpers, welche nur seinen Äther, nicht aber den Erdäther betrifft —, wird sein Äther sehr wohl merklich (E 405).

bar verständlich, wenn man bedenkt, daß die Energie beim Mitschwingen aus dem Wellenzug aufgenommen und dann erst wieder weitergegeben wird (A 83).

138. Der Äther in der Umgebung der Erde ist an ihr ruhend. — Hier kommen wir zur Beschreibung des Interferenzversuches (23), welcher in einfachster Deutung gezeigt hat, daß der Äther in der Umgebung der Erde mit ihr geht, was wir bereits eingangs der Optik vorangestellt hatten (4).

Schon Maxwell dachte die Entscheidung der Frage, ob dem so sei, oder ob die Erde bei ihrer Bewegung im Himmelsraum einen diesen Raum erfüllenden, ruhenden Äther durchsetzt, herbeizuführen durch vergleichende Lichtgeschwindigkeitsmessungen in Richtung der Erdbewegung und senkrecht dazu. Solche Messungen sind am besten unmittelbar vergleichend durch Interferenz auszuführen. Abb. 49 zeigt schematisch den benutzten Apparat. Er besteht im wesentlichen aus drei fest miteinander verbundenen Spiegeln, S_1, S_2, S_3. S_1 ist eine unversilberte Glasplatte; S_2 und S_3 sollen möglichst vollkommen reflektieren. Das Licht der Quelle P wird von S_1 unter dem Einfall von 45° zu einem Teil nach S_2 hin gespiegelt, zum andern Teil nach S_3 hin durchgelassen. Diese beiden Strahlen kommen, von S_2 bzw. S_3 senkrecht zurückgeworfen, bei S_1 wieder zusammen und zur Interferenz, indem jetzt der erstgenannte Strahl seinen von S_1 durchgelassenen Teil, der zweitgenannte seinen an S_1 reflektierten Teil ins beobachtende Auge A senden kann. Die zu beobachtende Intensität wird somit vom Gangunterschied der beiden Strahlen $PS_1S_2S_1A$ und $PS_1S_3S_1A$ abhängen. Man sieht, daß es auf Gangunterschiede in den beiden Lichtwegen $S_1S_2S_1$ und $S_1S_3S_1$ auf den beiden Armen S_1S_2 und S_1S_3 des Apparats ankommt. Für gewöhnlich ist ein kleiner und zwar nicht für alle Punkte des Gesichtsfeldes gleicher Gangunterschied vorhanden, was bei monochromatischem Licht helle und dunkle Streifen im Gesichtsfeld erscheinen läßt, wie beim Interferenzrefraktor (134). Jede Änderung im Gangunterschied der beiden Arme muß sich dann durch eine Verschiebung der Streifen am Fadenkreuz des Beobachtungsokulares zeigen. Eine solche Verschiebung der Streifen könnte infolge der Erdbewegung bei Drehung der ganzen Vorrichtung um eine zur Zeichnungsebene senkrechte, durch den Mittelpunkt des Ganzen gehende Achse eintreten, wenn einmal der Arm S_1S_2 und dann S_1S_3 in die Richtung der Erdbewegung gebracht wird. Ist nämlich der Apparat in der Richtung des Pfeiles v bewegt, der Äther aber nicht mitbewegt, so kommt das von S_1 nach S_3 laufende Licht verfrüht bei S_3 an, weil S_3 ihm entgegenkommt, und dieser Zeitverkürzung entspricht eine Verminderung der Wellenzahl auf dem Wege S_1S_3. Allerdings wirkt dem eine Zeitvermehrung und also Wellenvermehrung auf dem Rückweg S_3S_1 entgegen, weil S_1 dem Lichte wegläuft; aber die beiden Wirkungen heben einander nicht auf, weil die Zeitvermehrung bei einem Nachlaufen größer ist als die Zeitverminderung bei einem Entgegenlaufen, da ersteres den Weg bis zum Zusammentreffen vermehrt, letzteres ihn aber vermindert. Es bleibt daher eine

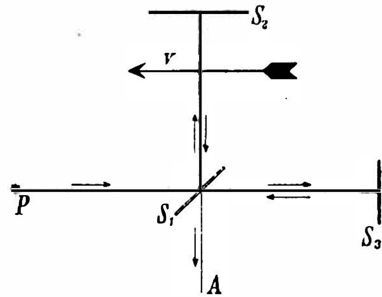


Abb. 49. Michelson-Apparat.

Differenzwirkung übrig, entsprechend einer Wellenzahlvermehrung auf dem Arm S_1S_3. Dieselbe wird freilich noch verkleinert durch einen Umweg, welchen das Licht auf dem anderen Arm S_1S_2 machen muß, weil S_1 fortbewegt wird, ehe das Licht von S_2 zurückkommt.[1]) Der bleibende, nach diesen Gedanken leicht zu berechnende kleine Rest ist ein Gangunterschied von $(L/\lambda)\cdot(v^2/c^2)$ Wellenlängen λ bei der Armlänge L (= Spiegelabstand $S_1S_2 = S_1S_3$) und der Geschwindigkeit v des Apparates relativ zum Äther. Die Streifenzahl, welche bei der angegebenen Drehung des Apparates um 90° am Fadenkreuz des Gesichtsfeldes vorbeiwandern müßte, wäre das Doppelte hiervon, weil der am einen Arm verschwindende Gangunterschied dann am andern Arm hinzukommt, was zusammenwirkt. Die Ausführung des Versuches verlangt große Vorsichten, weil überhaupt nur sehr kleine Wirkungen erwartet werden können. Die unzweifelhaft vorhandene, nach Größe und Richtung stets bekannte Geschwindigkeit der Erde im Sonnensystem ist die in ihrer Bahn um die Sonne; sie ist rund 30 km/sek[2]); diese Geschwindigkeit ergäbe bei einem im Sonnensystem ruhenden Äther mit der Armlänge $L = 2$ m und $\lambda = 500\,\mu\mu$ eine Verschiebung der Interferenzerscheinung um nur 0·08 Streifenbreiten. Es müssen daher Temperaturänderungen, auch der Luft, möglichst ferngehalten werden, und es dürfen keine Verbiegungen bei der erforderlichen Drehung des Apparates stattfinden. Man befestigt dazu alle seine Teile auf einer möglichst starren Grundplatte, umgibt sie mit einem Gehäuse und läßt das Ganze leicht drehbar auf Quecksilber schwimmen. Auch wurde die wirksame Armlänge L durch wiederholte Hin- und Herreflexionen längs der Arme mittels Hilfsspiegeln gesteigert. Der Versuch hat aber bei nun schon oftmaliger sorgfältigster Durchführung, auch auf hohen Bergen, niemals eine Streifenverschiebung von unzweifelhaft zu sichernder Größe ergeben, selbst nicht als die wirksame Armlänge bis zu 32 m gesteigert wurde, was bei $v = 30$ km/sek 1·3 Streifenbreiten Verschiebung ergäbe.

Daraus ist in einfachster Weise zu schließen, daß *die Erde bei ihrer Bewegung um die Sonne den Äther in ihrer Umgebung ganz oder doch zum größten Teil mitnimmt.* Auch für alle Bewegungen, die die Erde sonst etwa — mit dem ganzen Sonnensystem — haben mag, gilt dieser Schluß auf Mitnahme des Äthers; denn die Versuche hätten jede Relativbewegung von Erde und Äther angezeigt, wenn solche in einigem Betrage vorhanden wäre.

Weiter daraus folgende Schlüsse haben wir schon eingangs der Optik angegeben (23).

Ein Anlaß, weniger einfache Ursachen für den negativen Ausfall anzunehmen, besteht bei bisheriger Kenntnis nicht[3]), und jene einfachste Deutung steht in

---

[1]) Ob man derlei Verfeinerung bei der Rechnung mitberücksichtigt, wie hier geschehen, oder ob nicht, ist — beim negativen Ausfall des Versuches — für die zu ziehenden Schlüsse gleichgültig.

[2]) Die Geschwindigkeit der täglichen Drehung der Erde ist selbst am Äquator nur 0·46 km/sek.

[3]) Der Gedanke, daß eine „Kontraktion" des Apparates in seiner Bewegungsrichtung relativ zu einem ruhenden Äther ein positives Ergebnis des Versuches verhindere, hat sich nicht bewährt. Es müßte sonst jeder durch den Äther bewegte Körper solche Kontraktion zeigen, auch die Erde. Diese müßte dann wegen ihrer täglichen Drehung eine dauernde Umformung erleiden, so daß sie stets in Richtung ihrer Bahnbewegung abgeplattet wäre, und dies müßte entsprechende Änderungen der Schwerkraft hervorbringen (M 210), nach welchen mit sehr vervollkommneten Mitteln besonders gesucht worden ist, die sich aber als nicht vorhanden gezeigt haben.

bester Verbindung mit allem gesichert Bekannten (vgl. besonders E 405), das stets in vollem Umfange zu beachten ist, wie es im Vorliegenden bei Durchführung jener Deutung und der daraus folgenden Schlüsse durch alle Teile der Physik auch geschehen ist.

Auch andere, elektrische Versuche mit beweglichen geladenen Kondensatoren[1]) sind ausgeführt, die zum Teil in noch empfindlicherer Weise Relativbewegungen des Äthers gegen Erde anzeigen könnten, und sie sind alle ebenfalls negativ verlaufen[2]).

Der Äther ist damit als Anhalt für Absolutbewegung ausgeschaltet (vgl. M 46).

Besonders bemerkenswert ist es, daß der Interferenzversuch (Abb. 49) auch mit außerirdischem Licht (Fixstern- und Planetenlicht) negativ verlaufen ist (Tomaschek 1923). Da außerirdisches, aus dem Uräther kommendes Licht bei seiner Durchsetzung des Erdäthers keine Querbewegung von demselben annimmt (26), so konnte gedacht werden, daß es vielleicht auch längs noch weiter relativ zum Uräther mit der Geschwindigkeit c läuft, in welchem Falle das Ergebnis des Versuches hätte positiv sein können. Der negative Ausfall zeigt, daß das außerirdische Licht sich auf Geschwindigkeit c relativ zum Erdäther eingerichtet hatte. Es hat also hier eine Geschwindigkeitsänderung der Lichtwellen stattgefunden; denn ursprünglich, im fernen Himmelraum, lief das Licht des Fixsterns keinesfalls schon mit einer relativ zur Erde eingerichteten Geschwindigkeit. Der Fall entspricht der einfachen Auffassung, daß die Lichtgeschwindigkeit überall relativ zum Äther des Ortes sich einrichtet, entsprechend unserer Definition des Äthers (4, 23).

139. Äther und Drehbewegung. — Ein anderer, sehr wichtiger Interferenzversuch, Ätherbewegung betreffend, ist ausgeführt worden zur Frage, ob der nach vorigem an der fortschreitenden Bewegung der Erde teilnehmende Äther auch an ihrer täglichen Drehung teilnimmt. Es war dazu nötig, zwei Lichtstrahlen zur Interferenz zu bringen, die in möglichst großem Kreise in entgegengesetzter Richtung an der Erdoberfläche herumgelaufen sind, der eine in der Drehrichtung der Erde, der andere ihr entgegen. Sie müßten, wenn der Äther, in welchem die Strahlen laufen, nicht mitgedreht wird, einen Gangunterschied aufweisen, den ein sonst gleichgeleitetes, aber auf kurzem Wege zurückkehrendes, vergleichsweise zu beobachtendes Strahlenpaar nicht zeigt. Der Versuch könnte am besten am Erdpole ausgeführt werden, nicht am Äquator; in zwischenliegenden Breiten kann er ein teilweises Ergebnis liefern (gleich Foucaults Pendelversuch, M 244). Wegen der geringen Drehgeschwindigkeit der Erde muß die vom Strahlenweg umkreiste Fläche, deren Größe die zu erwartende Streifenverschiebung proportional ist, möglichst 1 km^2 nahekommen. Der Versuch wurde bisher nur einmal ausgeführt. Der Strahlenweg war rechteckig, mit Seitenlängen von einigen 100 m. Die Strahlen liefen in ausgepumpten Röhren; an den vier Ecken standen Spiegel, deren einer die Zweiteilung des Strahles besorgte, wie der Spiegel S_1 in Abb. 49. Zwei Hilfsspiegel lieferten den zum Vergleich zu benutzenden abgekürzten Strahlweg. Der Ausfall war insofern positiv, als die bei nicht mitgedrehtem Äther zu erwartende, allerdings kaum $^1/_4$ Streifenbreite betragende Verschiebung im Mittel vorhanden sich zeigte, allerdings oft verdeckt von störenden Schwankungen des Interferenzbildes. Ein Versuch von solcher Wichtigkeit müßte

[1]) Der Kondensator ist an einem Torsionsfaden drehbar so aufgehängt, daß die Platten vertikal, die Kraftlinien also horizontal gerichtet sind. Findet eine Bewegung des Ganzen in horizontaler Richtung (am besten unter 45° zur Kraftlinienrichtung) relativ zum Äther des Ortes statt, so suchen sich die Kraftlinien quer zur Bewegungsrichtung zu stellen (vgl. E 125, 492), was eine Drehung des Kondensators am Faden erwarten läßt, auf deren Eintreten bei Aufladung des Kondensators geachtet wird. Der Gesamtvorgang im bewegten Kondensator ist allerdings nicht einfach, und quantitative Verwertung des Versuches daher bisher nicht völlig beruhigend.

[2]) Am besten gesichert zeigt wohl die Induktion in bewegten Leitern an, daß, wie die Erde, so überhaupt jeder Körper einen eigenen, mitbewegten Äther hat (E 405).

ungeachtet der erforderlichen großen Mittel unter möglichst verbesserten Umständen weiterverfolgt werden.

Neuere, sehr verfeinerte elektrische Versuche von der in 138 erwähnten Art, welche ein Nichtmitfolgen des Äthers an der Erdoberfläche hätten anzeigen können, verliefen — im Gegensatz zum eben erläuterten optischen Versuch — negativ. Die Drehgeschwindigkeit der Erdoberfläche am Beobachtungsort (Dresden) betrug dabei 285 m/sek; 100 m/sek oder mehr gegen den Äther des Ortes hätten nachweisbar sein können, zeigten sich aber nicht.

Man kann dies negative Ergebnis dahin auffassen, daß die Massen der Erdkruste ihren Äther in ihrer Umgebung stets mitführen — ob bei fortschreitender oder bei drehender Bewegung der Erde — und daß die Äther der anderen, vom Beobachtungsort entfernteren Teile der Erde, die bei der Drehbewegung andere (teils kleinere, ja entgegengerichtete) Geschwindigkeiten haben, wegen ihres größeren Abstandes vom Beobachtungsort nicht merklich an diesem mitwirken. In genügendem Abstand von der Erde würde danach jede Beteiligung ihres Äthers an ihrer Drehbewegung verschwinden.

b) Beugung.

Allgemeines.

140. Überlegung nach Huygens' Prinzip. — Beugung ist die Abweichung von der geradlinigen Ausbreitung bei Wellen; sie ist das Um-die-Ecke-gehen von Wellen, — eine Eigenschaft, die allen Wellen zukommt (vgl. A 28) und zwar um so mehr, je länger sie sind. Dies ist nach Huygens' Prinzip einzusehen, wie im folgenden zu zeigen ist.

Wendet man Huygens' Prinzip so an, wie wir es in Abb. 17 getan haben (39), und ist die ursprünglich gegebene Wellenfront FF begrenzt, so etwa daß vom Punkte **W** an nach links hin ein undurchlässiger Schirm $W W_1$ (Abb. 17) sich befindet, so bleibt die Frage: Was wird aus den hinter den Schirm hinausgreifenden Teilen der Einzelwellen? Überhaupt kann man fragen, was aus all den Teilen der Einzelwellen wird, die nicht in die gemeinsame umhüllende, die neue Wellenfront ergebende Fläche F′F′ fallen? Die Antwort ist, daß sie im allgemeinen durch Interferenz vernichtet werden und zwar um so vollständiger, je kleiner die Wellenlänge ist. Man sieht dies durch eine etwas veränderte Anwendung von Huygens' Prinzip ein:

141. Interferenzen der Einzelwellen. — Es sei (Abb. 50, zunächst ohne die undurchsichtigen Wände W und W′) eine Wellenfront F F mit der durch die Pfeile angezeigten Strahlrichtung gegeben, und man frage nach der Wirkung aller von den Punkten dieser Wellenfront ausgehenden Einzelwellen auf einen gegebenen Punkt A jenseits der Wellenfront; aA, bA, cA usw. sind Radien dieser Einzelwellen. Da sie sämtlich mit gleicher Phase von F F ausgehen, aber ungleiche Wege nach A hin haben, werden viele dieser Wellen bei A einander durch Interferenz vernichten müssen und zwar kann man die einander vernichtenden Wellenzüge paarweise in Bündeln mit je ½ Wellenlänge Wegunterschied und nahe gleicher Intensität zusammenfassen. Ein solches Bündelpaar bilden beispielsweise die zwischen b und c ausgehenden Wellen mit den zwischen c und d ausgehenden; denn es ist zu jedem Einzelwellenzug in einem dieser Bündel ein Wellenzug mit $\lambda/2$ Wegunterschied im andern Bündel vorhanden. Die Abbildung zeigt diese Wegunterschiede durch die von A aus beschriebenen Kreisbögen, welche überall die Abschnitte $\lambda/2$ ergeben und auch für zwischenliegende Punktpaare in den Abschnitten bc und cd ebenso $\lambda/2$ ergeben würden.

Dabei sind die nach A hin wirkenden Intensitäten dieser einander benachbarten Bündel nahe einander gleich, weil sie von nahe gleichen Teilen der ursprünglichen Wellenfront kommen und nahe gleiche Wege bis A haben. Die Vernichtung kann also als nahe vollständig erwartet werden, ebenso nahe als jene Gleichheiten zutreffen.

142. Freie Wellenfront. — Untersucht man in dieser Weise das Zusammenwirken der Einzelwellen bei vollkommen freier Ausgangsfläche F F

Abb. 50. Beugung.

(ohne alle Schirme W, W') eingehend, so faßt man am besten ringförmig um a als Mittelpunkt gelagerte Bündel zusammen, wie sie durch jeden der Abschnitte bc, cd, de usw. in der Abb. 50 gegeben sind. Jedes dieser Ringbündel vernichtet sich mit den beiden ihm benachbarten Hälften seiner angrenzenden Bündel um so vollständiger, je näher gleiche Intensitäten mit paarweise genau $\lambda/2$ betragendem Wegunterschied zusammenkommen, was alles um so näher zutreffen kann, je kleiner die Wellenlänge λ ist. Es bleibt dann nur die um a gelagerte Hälfte des zentralen Bündels unvernichtet übrig, und dies ist der tatsächlich als Strahl nach A kommende Teil der Wellenfront, als Ergebnis der Gesamtwirkung von F F auf A, wie es Huygens' Prinzip auch ohne weiteres angibt. Die zugehörige, eingehend von Fresnel (1818) durchgeführte Rechnung

stimmt um so besser — Gleichheiten der Intensitäten und also vollständige Vernichtungen betreffend —, je kleiner die Wellenlänge im Verhältnis zum Abstand aA ist, wie es schon schätzungsweise zu sehen war. Die Rechnung kann als eingehender Nachweis der Verträglichkeit von Huygens' Prinzip mit den Kenntnissen über Interferenz betrachtet werden (vgl. 39).

143. Beugung um die Kante eines Schirmes. — Wird ein Schirm W W bis b vorgeschoben (Abb. 50), so daß er alle geradlinige Fortpflanzung nach A hin verhindert, so tritt gegenseitige Vernichtung der Bündel bc und cd, de und ef usw. in der schon betrachteten Weise ein, soweit deren Intensitäten paarweise genügend nahe gleich sind, wie es bei kleinen Wellen der Fall ist (142), und es wird daher in A nahezu Dunkelheit zu erwarten sein, fast wie es dem geometrischen Schatten bei rein geradliniger Ausbreitung entspricht, so daß von Beugung nur wenig zu merken ist.

Ist dagegen die benutzte Wellenlänge größer, etwa $\lambda_1 = 4\lambda$, wie es Abb. 50 als Beispiel langer Wellen zeigt, so sind die beiden Bündel bf und fg, welche wieder paarweise Einzelwellen mit dem Gangunterschied der halben Wellenlänge — jetzt $\lambda_1/2$ — enthalten, schon zu ungleich in Breite und in der Abschwächung bis A hin, als daß ihre Vernichtung nahe vollständig sein könnte. Es wird also hinter dem Schirm W W deutliche Aufhellung des geometrischen Schattens, d. i. deutliche Beugung zu erwarten sein. Dies ist die Begründung der mit der Länge der Wellen zunehmenden Beugung nach Huygens' Prinzip. Die Beugung erscheint hierbei als Folge der Nicht-Vernichtung der seitlich gehenden Teile der Elementarwellen durch Interferenz.

144. Schirm mit Öffnung. — Benutzt man mit der Wellenlänge λ einen Schirm W'W' mit einer Öffnung von der Größe bc (Abb. 50), so können die von den Punkten der Öffnung nach A hin gehenden Einzelwellen einander nicht vernichten; sie werden einander größtenteils unterstützen, weil hier der Wegunterschied $\lambda/2$ überhaupt nur als Grenzfall einmal vorkommt. Es wird also bedeutende Intensität nach A hin abgebeugt werden, mehr als wenn die Öffnung größer wäre.

Beträgt die Breite der Öffnung nur $\lambda/2$ oder weniger, so kann auch unter 90^0 Beugungswinkel keine Vernichtung stattfinden; es muß dann also allseitige Zerstreuung des durch die Öffnung gegangenen Lichtes stattfinden. Dies ist der Extremfall der Beugung, wobei jeder geradlinige Strahl aufhört. Man sieht, daß dieser Fall bei jeder, auch kleinster Wellenlänge eintreten kann, wenn nur die beugende Öffnung entsprechend klein, nämlich von der Abmessung einer halben Wellenlänge, oder darunter, genommen wird. Man sieht auch, daß Wellenstrahlen nicht beliebig schmal gemacht werden können; nur Strahlenbündel, deren Breite groß ist gegenüber der Wellenlänge, können erzeugt werden[1]).

Man sieht hier die Grenzen der Anwendbarkeit aller Ergebnisse der geometrischen Optik: Es dürfen keine beliebig schmalen „Strahlen" in Betracht kommen und es müssen daher die Abmessungen der strahlenaussondernden Spiegel, Prismen, Linsen usw. groß gegen die Wellenlänge des

[1]) In diesem Sinne ist die Abb. 1 des Lichtstrahls (und ebenso Abb. 94 in Bd. IV) als schematisch zu nehmen.

Lichtes sein. Hieraus ist z. B. in der Hauptsache auch schon ersichtlich, daß formgetreue mikroskopische Abbildung von Gegenständen, die kleiner als die Wellenlänge des benutzten Lichtes sind, nicht erwartet werden kann, was wir später noch eingehender betrachten (151).

145. Nadelschatten. — Am unmittelbarsten deutlich wird die Tatsache der Beugung des Lichtes, wenn man Schattenbilder schmaler, undurchsichtiger Gegenstände, z. B. einer Nähnadel, in gut homozentrischem Lichte auf einem Schirm beobachtet. Es kann dann das von beiden Seiten der Nadel in ihren geometrischen Schatten hineingebeugte Licht zur Interferenz kommen, und da die beiderseitigen Wege nach der Mitte des Schattens hin gleich lang sind, wird eben dort Helligkeit erscheinen, wo man nach rein geradliniger Ausbreitung größte Dunkelheit erwarten würde: Die Mitte des Schattens erscheint aufgehellt; die Nadelspitze erscheint infolgedessen im Schattenbild vollkommen zweigeteilt. Bei genügendem Schirmabstand und also großem Schattenbild sieht man noch weitere Einzelheiten. Es erscheinen an beiden Seiten von der Mitte helle und dunkle Streifen als Folge der Gangunterschiede, die dort abwechselnd Auslöschung und Verstärkung des von beiden Nadelseiten gebeugten Lichtes geben; und solche der Schattengrenze parallel laufende Streifen finden sich auch außerhalb des geometrischen Schattens. Im weißen Lichte sind infolge der Verschiedenheit der Wellenlängen seiner Bestandteile alle Streifen farbig.

146. Allgemeine Berechnungsweise von Beugungserscheinungen. — Alles, was man im eben betrachteten Falle und in ähnlichen Fällen an Stelle des einfachen geometrischen Schattens sieht, ist in der an den Beispielen (143 bis 145) schon erläuterten Weise Folge von Beugung und der damit verbundenen Interferenz. Der Beweis dafür ist in sehr zahlreichen Fällen verschieden gestalteter „beugender Schirme" und Öffnungen geliefert, derart, daß die Intensitätsverteilung im Beugungsbild jedesmal als Interferenzergebnis berechnet und mit der Beobachtung übereinstimmend gefunden wurde.

Die Berechnung geht stets nach dem Gedanken vor, daß für jeden Punkt der Bildfläche (wie A in Abb. 50) die Wirkung sämtlicher, von allen freien Stellen des beugenden Gegenstandes nach dem Punkt laufenden Einzelwellen zu summieren ist. Jede Welle wird dabei nach Maßgabe ihrer Phase (geometrisch, s. M 45) in die Summe gesetzt, so daß gleiche Phasen mit gleichem Vorzeichen, entgegengesetzte mit entgegengesetztem Vorzeichen als Summanden erscheinen. Man nimmt dabei Sinuswellenzüge an; die Übereinstimmung der Rechenergebnisse mit der Beobachtung von Helligkeitsverteilungen in Beugungsbildern (z. B. 148) zeigt, daß die Annahme mit der Wirklichkeit übereinstimmt, soweit monochromatisches Licht erhältlich ist. Im allgemeinen und bei genauer Rechnung wird die Summe aus unendlich vielen Summanden bestehen, entsprechend den unendlich vielen Flächenelementen, welche der beugende Schirm frei läßt; sie ist dann ein Integral oder die Summe einer unendlichen Reihe und nach den dafür geltenden Rechenmethoden ermittelbar.

147. Beobachtungsweisen. — Die mit der Rechnung zu vergleichende Beobachtung kann in verschiedener Weise geschehen. Man kann, wie bisher vorausgesetzt, die Erscheinungen auf einem Schirm aus Papier oder Mattglas auffangen. Man kann aber auch den Schirm weglassen und eine Lupe benutzen,

welche die Strahlen empfängt und auf die nun leere Schirmebene eingestellt ist (65); man sieht dann die Erscheinung lichtstärker und vergrößert. Dies ist Fresnels Beobachtungsweise, die er auch bei seinem Spiegelversuch anwandte (132).

Man kann aber auch die beugende Öffnung dicht vor das Objektiv eines auf unendliche Entfernung eingestellten Keplerschen Fernrohrs bringen. Visiert man dann einen fernen leuchtenden Punkt durch das Fernrohr an, so sieht man an Stelle des Punktbildes die durch die Öffnung hervorgebrachte Beugungserscheinung. Dies ist Fraunhofers Beobachtungsweise. Sie hat den Vorteil, eine einfachere, leichter exakt durchführbare Rechnung zu geben. Denn das Objektiv des auf Unendlich eingestellten Fernrohrs bringt parallele Strahlen zur Vereinigung und damit auch zur Interferenz, ohne ihnen einen Gangunterschied hinzuzufügen (vgl. 71 und Abb. 33); man hat also nur mit den Gangunterschieden paralleler, gebeugt aus der Öffnung tretender Strahlen zu rechnen. Wir führen eine solche einfache Rechnung weiter unten für den Fall zweier beugender Spalte durch (148, vgl. auch 152).

Endlich kann man die beugende Öffnung auch einfach vor die Pupille des auf einen fernen leuchtenden Punkt blickenden Auges halten; die Linse des Auges wirkt dann wie die Fernrohrlinse, und das Beugungsbild entsteht unmittelbar auf der Netzhaut.

Vielerlei beugende Öffnungen verschiedener Gestalten und Gruppierungen kreisförmiger, dreieckiger, quadratischer Begrenzung, von Spalten und Spaltgruppierungen usw., sind so nach Fresnel und Fraunhofer besonders auch von Schwerd untersucht, und die Rechnung auf der angegebenen Grundlage ist in den zahlreichen und sehr mannigfaltigen dabei auftretenden Erscheinungen stets bestätigt gefunden worden, was ebensoviele Nachweise für das Zutreffen der in der Rechnung vorausgesetzten Wellennatur des Lichtes liefert.

Alle so zu beobachtenden Erscheinungen werden um so ausgeprägter, je kleiner die beugenden Öffnungen sind. Ein feiner Nadelstich in Staniol ist z. B. eine sehr geeignete beugende Öffnung; sie gibt vor dem Fernrohrobjektiv in weißem Licht wohlentwickelte farbige Ringe um den hellen Mittelpunkt. Je größer die Öffnung gemacht wird, desto mehr ziehen sich die Ringe zusammen, um bald unmerklich zu werden, so daß dann bloß das Bild des anvisierten leuchtenden Punktes im Sinne der geometrischen Optik übrig bleibt. Jedes gewöhnliche Bild im Fernrohr, z. B. eines Sternes, ist aber immer noch von der — wenn auch äußerst feinen — Beugungserscheinung umgeben zu denken, welche der vollen Objektivöffnung als beugender Öffnung entspricht.

Zwei Öffnungen.

148. Einfache Herleitung des Beugungsbildes. — Wir betrachten nun besonders den wichtigen, für vieles Weitere aufschlußreichen Fall zweier enger Öffnungen (paralleler Spalte) o p in undurchsichtiger Wand W (Abb. 51). Der Abstand der beiden Öffnungen sei b, das Licht komme von links her an die Wand, es sei einfarbig, z. B. rot, und es werde die rechts entstehende Beugungserscheinung zunächst in Fresnels Weise (147) auf einem Schirm S (oder mittels Lupe) beobachtet.

Es kommt hier, bei engen Öffnungen, in der Hauptsache nur auf je zwei gebeugte Strahlen an, die von den zwei Öffnungen ausgehend auf dem Schirm zusammentreffen und deren Wegunterschiede zu betrachten sind[1]). Die einfallende Wellenfront sei parallel W; es haben dann die beiden Öffnungen stets gleiche Phase. Daher wird am Schirmpunkt h, wohin gleiche Wege von beiden Öffnungen führen, jedenfalls Helligkeit zu erwarten sein — sogar für alle Wellenlängen —; am benachbarten Punkt d_1 wird dagegen Dunkelheit sein,

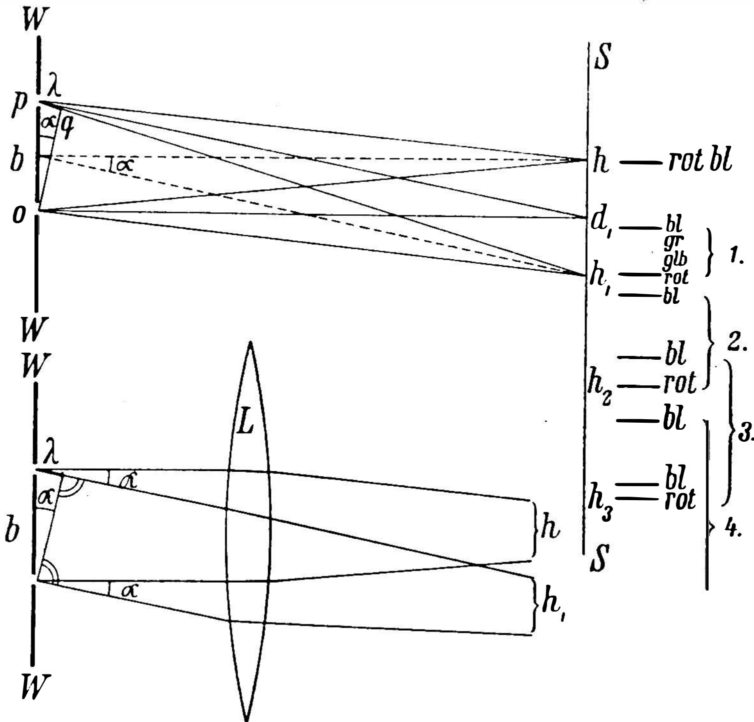


Abb. 51 (oben) und 51a (unten). Zwei Öffnungen (Gitter)

wenn der Wegunterschied dorthin ½ Wellenlänge des wirkenden Lichtes beträgt. Am Punkte h_1 mit dem Wegunterschied einer ganzen Wellenlänge λ wird wieder Helligkeit sein und ebenso an den weiteren Punkten h_2, h_3, ... mit den Wegunterschieden 2λ, 3λ, ... Zwischen je zwei Helligkeiten wird Dunkelheit sein, wie bei d_1, wegen der ungradzahligen Halbwellenlängen im Wegunterschied. Die Beobachtung zeigt, daß Helligkeiten und Dunkelheiten allmählich ineinander übergehen, wie es der Amplitudenverteilung in Sinuswellen entspricht, und der gleiche Wechsel von Helligkeiten und Dunkelheiten findet sich auch an der anderen Seite des Punktes h, der die Mitte der ganzen Erscheinung bildet.

Daß die Erscheinung von der Mitte aus nach beiden Seiten hin allmählich matter werden muß, und zwar um so schneller je kleiner die benutzte Wellen=

[1]) Es ist hier der bei Schallwellen betrachtete analoge Fall zu vergleichen (A 76).

länge ist und je weniger eng die Öffnungen (Spalten) sind, dies ergibt sich aus der oben (144) für eine einzelne Öffnung schon durchgeführten Überlegung, wonach bei genügend kleiner Wellenlänge und genügend weiter Öffnung schon die von verschiedenen Punkten der einzelnen Öffnung ausgehenden Wellen in einigermaßen gebeugter Richtung der Interferenzvernichtung verfallen.

149. Vergleichung mit Fresnels Spiegelversuch. — Die hier betrachteten, hinter den zwei Öffnungen auftretenden Interferenzstreifen sind übrigens dieselben, welche auch bei Fresnels Spiegeln schon auftraten (131); sie entsprechen in beiden Fällen denselben verschiedenen Wegunterschieden von zwei festen, stets gleiche Phase haltenden Lichtquellen aus. Der Unterschied liegt nur darin, daß beim Spiegelversuch die beiden Lichtquellen mittels zweier Spiegel, hier aber mittels zweier Öffnungen aus einer Lichtquelle gemacht wurden (was die Phasengleichheit verbürgt) und daß beim Spiegelversuch rein gradlinige Ausbreitung, hier aber Beugung die Wellen der zwei Quellen zusammenkommen und interferieren ließ.

Unsere Betrachtungsweise der beiden Fälle war insofern verschieden, als wir beim Spiegelversuch den ganzen, von Wellen erfüllten Raum betrachtet haben (vgl. Abb. 47), während wir hier nur eine einzige Schirmebene berücksichtigten, als fände überhaupt erst dort Interferenz statt. Das Ergebnis für die Schirmebene ist in beiden Fällen dasselbe; die ganze Verteilung der Lichtenergie (d. i. der elektrischen Energie, 101) ist aber gegeben durch die bei Fresnels Spiegelversuch erwähnten Hyperbeln, welche alle Orte gleicher Phasen der Elementarwellen beider Quellen miteinander verbinden. Um zu diesen Hyperbeln der Verstärkung zu gelangen, muß die von den Öffnungen ausgehende Energie die zwischenliegenden Hyperbeln der Auslöschung passieren, wo sie nicht als Lichtenergie vorhanden ist. Die Überlegung nach den Eigenschaften der elektromagnetischen Wellen (E 410 u. f.) zeigt, daß die Energie dort rein magnetische Energie ist, die unsichtbar ist[1]). Die Interferenzen-Überlegung hat das Eigentümliche, daß sie die Lagen der Helligkeits- und Dunkelheitsstellen unabhängig von der Kenntnis der Zwischenvorgänge richtig aus den Gangunterschieden der ganzen Wege in der angegebenen Weise ermittelt (vgl. die Energiewegweisung durch Interferenz, 162—164).

150. Winkelabstände der Streifen. — Die Ermittelung der Lagen der hellen Streifen ist auch leicht in Rechnung durchzuführen. Man beschreibe von h_1 als Mittelpunkt aus den Kreisbogen o q (Abb. 51); es muß dann die abgeschnittene Strecke p q gleich der Wellenlänge λ sein, weil h_1 die erste Helligkeitsstelle neben der Mitte h ist. Der Kreisbogen o q ist nahe gradlinig, wenn der Schirm S weit von der Wand W ist, und das Dreieck o p q ist dann bei q nahe rechtwinklig, während sein anderer Winkel p o q (wegen aufeinander senkrecht stehender Schenkel) gleich dem Winkel α ist, unter welchem die Streifenbreite h h_1 von der Wand aus gesehen erscheint und welche somit ein Maß für die Streifenbreite beim gegebenen Abstand W S ist. Es ist aus dem genannten Dreieck

$$\sin\alpha = \frac{\lambda}{b}, \qquad 150)$$

und man sieht, daß die Streifen um so breiter werden, je größer die Wellenlänge λ des Lichtes und je kleiner der Öffnungsabstand b ist. Wegen der Kleinheit von λ bei allem sichtbaren Licht kann man daher eine gut entwickelte Streifenerscheinung nur bei entsprechend kleinem b erhalten, was mit der vorausgeschickten allgemeinen Bemerkung (147) über die zu ausgeprägten Beugungserscheinungen erforderliche Kleinheit der Beugungsöffnungen oder Schirme übereinstimmt. Ebenso kann man an dem Sonderfalle des Öffnungspaares auch sehen, was bei zu weit gehender Kleinheit eintritt. Ist nämlich $b = \lambda$, so

[1]) Elektrische und magnetische Energie treten hier in derselben Weise einander ersetzend auf, wie Druck und kinetische Energie bei Interferenzen der Schallwellen (vgl. A 76).

wird $a = 90^0$, d. h. es bleibt nur die helle Mitte h der Erscheinung übrig, seitlich allmählich in Dunkelheit übergehend; ein zweites Helligkeitsmaximum h_1 kommt überhaupt nicht zustande.

151. Dieser Grenzfall des Öffnungsabstands gleich der Wellenlänge, $b = \lambda$, ist von Bedeutung zur Beurteilung der Grenzen der Leistungsfähigkeit der Mikroskope. Man sieht alles hierfür Wesentliche ein, wenn man nur den Fall zweier heller Pünktchen als mikroskopischen Gegenstand überlegt. Ist der Abstand der beiden Pünktchen nicht größer als die Wellenlänge des benutzten Lichtes, so ist die ins Mikroskopobjektiv gehende Lichtverteilung kaum eine andere als wenn nur ein Pünktchen da wäre, nämlich ziemlich gleichförmige Zerstreuung des Lichtes; man kann daher im Mikroskop auch nicht viel anderes zu sehen erwarten als nur ein Pünktchen, obgleich deren zwei als Gegenstand vorhanden sind. Schon Fraunhofer hat so die Grenzen nutzbarer Mikroskopvergrößerung erkannt, wie wir sie bereits erwähnten (69); er sagt: „Ein mikroskopischer Gegenstand, dessen Durchmesser gleich der Lichtwellenlänge ist und der aus zwei Teilen besteht, kann nicht mehr als aus zwei Teilen bestehend erkannt werden" (vgl. auch 144).

152. Wellenlängenmessung. — Die Gleichung 150 hat schon früh auch den besten Weg zu feinen Wellenlängenmessungen gegeben; sie ist jedoch bei der bisher von uns betrachteten Fresnelschen Beobachtungsweise, wie in Abb. 51, nur angenähert richtig wegen der nur angenäherten Gradlinigkeit und Rechtwinkligkeit des benutzten Dreiecks (150). Genau richtig wird die Gleichung aber, sobald man zu Fraunhofers Beobachtungsweise (147) übergeht (Abb. 51a). Man beobachtet dann mit einem Fernrohr, dessen Objektivlinse L das von den Öffnungen kommende Licht empfängt. Da die Linse keine Gangunterschiede hinzufügt (71), ist wieder dasselbe Dreieck mit den Seiten λ und b und dem Winkel a (Abb. 51) maßgebend, nur ist es hier einfach gradlinig und genau rechtwinklig. Denn ist das Fernrohr auf unendliche Gegenstandsweite eingestellt, so kommen nur parallele Strahlen für das mit dem Okular zu betrachtende Bild zur Wirkung, so daß die in Abb. 51a doppelt angezeichneten Winkel 90^0 betragen. Zu genauer Messung des Winkels a, der auch hier wieder (wegen senkrecht aufeinander stehender Schenkel, Abb. 51a) als Winkelgröße der Streifenbreite auftritt, wird das Fernrohr an einem Teilkreise drehbar gemacht, in dessen Mittelpunkt W W mit den Öffnungen (Spalten) steht. Die nötige, W W parallele, ebene Wellenfront des benutzten Lichtes wird durch ein mittels Kollimator (62) parallel gemachtes, von einem Spalt kommendes Strahlenbündel erreicht. In dieser Weise hat Fraunhofer zuerst feine Wellenlängenmessungen ausgeführt (1822), nur daß er statt bloß zweier Spalte seine vorteilhafteren „Gitter" benutzte, die wir w. u. betrachten (155). Daß die so gemessenen Wellenlängen übereinstimmen mit den aus Newtons Ringen (127) oder Fresnels Spiegelversuch (132) erschlossenen, dies ist wieder eine — nach so vielen Bestätigungen von der Wellennatur des Lichtes allerdings schon fast selbstverständliche — Versicherung der Richtigkeit alles zur Erklärung der Beugungserscheinungen Vorgebrachten.

153. Wendet man statt einfarbigen Lichtes weißes Licht an, so entstehen in unmittelbar verständlicher Weise farbige Streifen, ganz wie es schon für

Fresnels Spiegel (131) und besonders eingehend für Newtons Ringe (128) erläutert wurde. In Abb. 51 sind die Stellen größter Helligkeit für Rot (h, h_1, h_2,..., s. 148) und für mehrere andere Farben, besonders auch für Blau eingetragen, entsprechend ihren Wellenlängen. In der Mitte h haben alle Farben volle Helligkeit; dort wird also weiß erscheinen; an den anderen Stellen fallen die Farben im allgemeinen auseinander. Die erste größte Helligkeit für Blau fällt nahe der ersten Dunkelheit d_1 des Rot, und es folgt dann gegen h_1 hin ein vollkommenes Spektrum von Blau (bzw. Violett) bis Rot, ein „Beugungsspektrum".

Diese Farbenerscheinung erhält große Intensität und beste Entwickelung bei Vervielfältigung der beugenden Öffnungen, wo wir eingehend darauf zurückkommen (155).

154. Fixsternbeobachtungen. — Bringt man ein Öffnungspaar vor dem Objektiv eines Fernrohres an, so können bei Beobachtung von Fixsternen mit demselben die auftretenden Beugungserscheinungen (147) unter Umständen zu Schlüssen benutzt werden auf räumliche Einzelheiten der Fixsterne — auf Doppelheit oder Durchmesser derselben —, die wegen des allzu großen Abstandes von der Erde der direkten Beobachtung verborgen sind.

Ein einfaches Beispiel wäre ein Doppelstern mit dem Winkelabstand ω der beiden Komponenten. Es müssen dann, der doppelten Lichtquelle entsprechend, zwei Beugungserscheinungen des Öffnungspaares auftreten, die sich überdecken. Fallen dabei die Stellen der Dunkelheit der einen Erscheinung mit denen der Helligkeit der anderen zusammen, so müssen die Beugungsstreifen am Bilde des Sterns verschwinden. Es tritt dies dann ein, wenn der Abstand b der beiden Öffnungen vor dem Objektiv so gewählt ist, daß $\sin\omega = \lambda/2b$. Denn ω, der Winkelabstand der zwei Sterne, ist dann zugleich der Winkelabstand zwischen Helligkeit und Dunkelheit im Beugungsbild eines der Sterne, weshalb hier in Gl. 150 ω statt α und $\lambda/2$ statt λ zu setzen ist. Kennt man b, so ist daraus ω berechenbar[1]). Für die Ausführung solcher Beobachtungen kommt es darauf an, zwei Öffnungen von verstellbarem Abstand vor dem Objektive zu haben, und den Abstand solange zu vergrößern, bis die feine, mit starker Okularvergrößerung zu beobachtende Beugungserscheinung verschwindet. Es kann das beim betrachteten Fall eines Doppelsterns allerdings nur dann eintreten, wenn die Verbindungslinie der beiden Öffnungen in Richtung der Verbindungslinie der beiden Sterne fällt, was durch Drehung des Öffnungspaares auszuprobieren ist und dann auch Aufschluß über letztere Richtung gibt. Verdoppelt man b, so muß das Beugungsbild wieder erscheinen.

Aber auch bei einem einfachen Stern kann das Verschwinden der Beugungserscheinung mit den zwei Öffnungen vor dem Fernrohrobjektiv eintreten, wenn der Stern einen genügenden Durchmesser hat, weil dann die verschiedenen Teile der leuchtenden Fläche des Sterns einander überdeckende Beugungserscheinungen liefern. Zu genauer Beurteilung des Falles sind in einer Rechnung, die grundsätzlich nichts Neues bietet, alle leuchtenden Punkte der Fläche zu beachten, und es kann auch die Größe und Form der zwei Öffnungen außer deren Abstand b mitberücksichtigt werden. Man erfährt durch solche Rechnung die bei Änderung des Abstandes b zu erwartenden Veränderungen des Beugungsbildes in Abhängigkeit vom Sterndurchmesser und man kann somit aus Beobachtungen des Beugungsbildes bei bekanntem b den Sterndurchmesser ermitteln. In dieser Weise ist der Winkeldurchmesser des roten Sternes α im Orion zu $\omega = 0{\cdot}047''$ ermittelt worden, was mit dem aus Parallaxenmessungen bekannten Abstand (rund 300 Lichtjahre) den wahren Durchmesser zu 420 Sonnendurchmessern ergibt. Eine Ermittelung des Durchmessers auf völlig verschiedenem Wege (W 189) hat ihn von gleicher Größe erwiesen, was eine bemerkenswerte Festigung von Kenntnissen weit voneinander entlegenen Ursprungs bedeutet[2]).

---

[1]) Für λ ist, wenn nicht durch monochromatisches Glas beobachtet wird, die Wellenlänge des für das Auge hellsten, etwa des grüngelben Lichtes einzusetzen.

[2]) Es sind nun schon viele Sterndurchmesser auf diesem „interferometrischen" Wege ermittelt worden, wonach man viele „Riesensterne", wie α im Orion, kennt. Bei einigen Sternen (wie Arktur) gibt die Durchmesserermittelung aus Temperatur und absoluter Helligkeit (W 189) abweichende Ergebnisse; hierzu sehe man die zweite Fußnote zu W 189.

Andere Fixsterne haben meist viel kleinere Winkeldurchmesser, so daß die Durchführung der Messung schwierig wird; es wurden Öffnungsabstände b bis zu 15 m benutzt. Da dies die ganze Objektivöffnung des Fernrohres übersteigt, wurden an Stelle der Öffnungen zwei unter 45° zur Fernrohrachse geneigte, seitlich am Objektiv angebrachte Spiegel benutzt, die das Licht senkrecht zur Fernrohrachse — gegen diese hin — auf zwei andere, ebenso gerichtete Spiegel lenkten, von denen es dann ins Fernrohr reflektiert wurde.

Gitter.

155. Gitterspektren. — Nimmt man an Stelle der bisher betrachteten zwei Spalten eine Reihe vieler gleicher Spalten in gleichen Abständen voneinander, so erhält man ein optisches „Gitter". Man kommt damit zu den lichtstärksten und ausgeprägtesten Beugungserscheinungen, die auch in vielen Anwendungen wichtig geworden sind.

Fraunhofers erste Gitter bestanden aus Drähten, die er kunstvoll einander parallel und äquidistant in einer Ebene ausgespannt hatte und deren Zwischenräume die lichtdurchlassenden Spalten bildeten. Auch durch Ziehen paralleler Striche auf einer berußten Glasplatte mittels der Teilmaschine (M 8) erhält man Gitter, deren Strich- (Spalt-) breiten und Strichabstand mit dem Mikroskop gut kontrollierbar ist. Noch feinere Gitter werden durch Diamantritzen auf Glasplatten hergestellt.

Sind die Spalten des Gitters eng, so kommen einfach so viele Strahlen zur Interferenz als Spalten da sind. Haben die Spalten eine gewisse, gegen ihren Abstand nicht sehr kleine Breite, so sind auch noch die Interferenzen der verschiedenen, von den Punkten jeder einzelnen Spalte kommenden Strahlen zu beachten. Berechnet man alle diese Interferenzen nach dem angegebenen einfachen Gedanken der Zusammensetzung von Wellen (146), so erhält man — zunächst bei engen Spalten — Folgendes:

Die Intensitätsverteilung im Beugungsbild besitzt dieselben Helligkeitsstellen wie bei nur zwei Spalten (148, h, h_1, ... in Abb. 51); es kommen jedoch neue Stellen der Auslöschung hinzu und zwar in um so größerer Zahl, je mehr Spalten das Gitter enthält. Diese Auslöschungsstellen häufen sich zwischen je zwei Helligkeitsstellen h bis dicht an diese heran, so daß dieselben bei einem sehr vielspaltigen Gitter äußerst schmal und scharf begrenzt werden. Dies wird bei Fraunhoferscher Beobachtungsweise (147), für welche auch die strenge Rechnung für die Abstände der Helligkeiten gilt (vgl. 152), am deutlichsten.

Benutzt man als Lichtquelle eine schmale, leuchtende, den Gitterspalten parallele Linie, etwa einen lichteinlassenden Spalt — fern aufgestellt oder mit Kollimator (62) —, so sieht man im Fernrohr durch ein vielspaltiges Gitter bei monochromatischem Licht schmale, scharfbegrenzte helle Linien als Helligkeitsstellen h, h_1, ..., wie es die rechte Seite von Abb. 51 darstellt[1]). Es sind dort diese Linien außer für das langwellige (rote) Licht auch für kurzwelliges (blaues oder violettes) Licht eingezeichnet. Letztere liegen, entsprechend dem Verhältnis der Wellenlängen (700 $\mu\mu$ für Rot, 400 $\mu\mu$ für Violett), etwas über halb so weit von der Mitte h und voneinander, als die roten Helligkeitsstellen. Ist gemischtes Licht vorhanden, so erscheint für jede seiner Wellenlängen die ent-

[1]) Man kann die Erscheinung in großer Helligkeit auch mit einer Linse auf einen Schirm projizieren, wenn man erst ein scharfes reelles Spaltbild auf dem Schirm entstehen läßt und dann das Gitter an passender Stelle in den Strahlengang einschiebt.

sprechend dieser angeordnete Linienverteilung, d. h. es erscheinen **reine Spektren** des benutzten Lichtes. Nur in der Mitte, bei h, fallen alle Wellenlängen zusammen, es wird also bei weißem Licht dort ein einfaches weißes Spaltbild erscheinen. Wir haben dieses Interferenzbild schon früher betrachtet als Ergebnis der Beugung durch nur zwei Öffnungen (153). Hier, beim Gitter, tritt dieselbe Wellenlängenverteilung auf, wie dort, jedoch mit dem Unterschied, daß jede einzelne bestimmte Wellenlänge nicht auf verwaschene Stellen größter Helligkeit verteilt sich findet, sondern in scharfbegrenzte Linien zusammengedrängt, die so schmal sein können als die lichtliefernde Spalte es ist. Daher die Reinheit (vgl. 50) der hier zu beobachtenden Spektren.

Da die Erscheinung an beiden Seiten der Mitte gleich ist, genügt es, die eine Seite näher zu betrachten, wie in Abb. 51, wobei wir weißes Licht voraussetzen. Nächst der Mitte h ist ein dunkler Raum; es würden dorthin nur kurzwelligste, ultraviolette Anteile des Lichtes fallen können. Dann folgt ein vollständiges, reines Spektrum von Violett bis Rot: das „Spektrum 1. Ordnung" (in der Abbildung durch eine Klammer mit 1 bezeichnet). Nach kleinem dunklen Zwischenraum beginnt, wieder mit Violett und Blau, das „Spektrum 2. Ordnung" (Klammer mit 2 in der Abbildung), dessen rotes Ende aber schon vom violetten Ende des „Spektrums 3. Ordnung" überdeckt wird (was dort Purpur gibt, vgl. 53). Die weiteren Spektren überdecken einander dann zu größeren Teilen und schließlich mehrfach, was alles unmittelbar aus den Wellenlängen und dem Wiederkehren jeder Farbe in gleichen Abständen[1]) folgt, wie es die Abbildung ersichtlich macht.

156. Erscheinungen bei nicht engen Gitterspalten. — Die beschriebene Erscheinung entspricht einem Gitter mit engen Spalten; ist die Spaltbreite größer, so kommen noch Interferenzen der Strahlen jeder einzelnen Spalte hinzu (155). Dies hat die Folge, daß mit zunehmender Spaltbreite bei gleichbleibendem Abstand b der Spaltmitten die Intensität der Erscheinung zwar dem vermehrten Lichteinlaß entsprechend ansteigt, daß aber das vorhandene Licht mehr nach der Mitte hin sich konzentriert (vgl. 148). Zugleich treten unter gewissen Winkeln — je nach der Spaltbreite — verteilte, neue Stellen vollständiger Auslöschung hinzu, die im schon beschriebenen Gesamtbild der Erscheinung verdunkelt bemerkbar werden. Ist die Spaltbreite ein einfacher ganzzahliger Bruchteil von b, so fallen dabei einzelne Ordnungen der Spektren ganz aus. Es steigt dabei die Helligkeit in den übrigbleibenden Teilen der Erscheinung entsprechend an.

Alle diese Intensitätsänderungen machen auch hier wieder ersichtlich, daß Auslöschung durch Interferenz niemals Energieverlust, sondern nur besondere Verteilung der Energie bedeutet, wie schon früher bemerkt (130). Ebenso ist es mit den vorher betrachteten, bei Spaltvermehrung hinzutretenden Auslöschungsstellen (155); die Rechnung zeigt, daß z. B. Verdoppelung der Spaltenzahl, also Verdoppelung des lichtzulassenden Querschnittes des Gitters nicht Verdoppelung der Helligkeit an den Stellen h, h_1, ... hervorbringt, sondern

[1]) Die Lagen aller Helligkeitsstellen richten sich, entsprechend Gl. 150, nach dem Sinus des Ablenkungswinkels α, sie finden sich also bei $\sin\alpha = \lambda/b$, $2\lambda/b$, $3\lambda/b$ usw. Insofern aber kleine Winkel ihrem Sinus gleich sind (vgl. M, Abb. 32), sind auch die Winkelabstände von der Mitte gegeben durch λ/b, $2\lambda/b$, ...

Vervierfachung, entsprechend der Änderung der Intensitätsverteilung — nämlich Abwanderung der Energie aus den Zwischenräumen der Stellen h nach diesen selbst[1]) (vgl. die allgemeine Betrachtung unter 162 u. f.).

157. Gitterspektroskopie. — Die beschriebene Erscheinung der reinen Spektren zeigt, daß ein gutes vielspaltiges, über seine ganze Fläche vollkommen — besonders in Hinsicht des Spaltabstandes — gleichmäßig beschaffenes Gitter vollwertiger Ersatz des Prismas zur Lichtanalyse sein kann. Schon Fraunhofer sah seine Sonnenlinien auch im Gitterspektrum. Dabei haben die Gitterspektren den großen Vorzug vor den Prismenspektren, daß in ihnen die einzelnen Lichtarten genau nach ihren Wellenlängen verteilt sind (155), so daß gleichen Abständen zweier Spektralstellen gleiche Wellenlängenunterschiede entsprechen, was die Ermittelung der Wellenlängen beliebiger beobachteter Lichter, z. B. von Fraunhofers Linien, sehr erleichtert, wogegen in den Prismenspektren die Wellenlängen je nach dem Stoffe des Prismas in verschiedener, zum voraus nicht exakt angebbarer Weise verteilt sind[2]).

Besonders geeignet für Spektralbeobachtungen sind die durch Ritzen von Glasplatten mittels geeigneter Diamantspitzen auf der Teilmaschine hergestellten Gitter. Die geritzten Stellen, an denen die Oberflächenebene zerstört ist, haben dann mehr oder weniger die Rolle der lichtundurchlässigen Stellen der Draht- oder Rußgitter (155), da sie die ursprüngliche Wellenfront zerstören. Auch auf Spiegelmetall werden Gitter geritzt, die dann im reflektierten Licht zu benutzen sind; ist das Gitter auf einen Hohlspiegel geritzt, so bedarf man keiner Linse zur Bildentwerfung, so daß das Licht — wenn man auch noch die Luft wegpumpt („Vakuumspektrograph") — spektral zerlegt werden kann ohne irgendein absorbierendes Medium durchsetzt zu haben, was für die Zerlegung kurzwelligen Ultravioletts (98, besonders Reflexviolett, Tab. 38) von Wichtigkeit ist.

Man hat Gitter mit über 1000 Strichen (Spalten) auf 1 mm hergestellt ($b < 0{\cdot}001$ mm); sie geben Spektren, bei welchen beispielsweise das gelbe Linienpaar des Natriums (82, Fraunhofers D im Sonnenspektrum) schon in der 1. Ordnung so weit getrennt ist, daß man dazwischen noch Linien anderer Elemente erkennen und ausmessen kann, — eine Leistung, die mit Prismen in gleicher Vollkommenheit nicht erreicht ist.

158. Verfeinerte Interferenzspektroskopie. — Will man in der spektralen Zerlegung noch weiter gehen, so stehen die Spektren höherer Ordnungen zur Verfügung; dieselben sind jedoch bei den betrachteten Gittern notwendigerweise (156) lichtschwach. Es ist indessen gelungen, die großen, in gleichen Stufen wiederholt zunehmenden Gangunterschiede, welche bei Entstehung dieser Spektren höherer Ordnung das Wesentliche sind, mit viel größerer Lichtstärke, als durch Beugung in großen Winkeln, in anderen Weisen hervorzubringen. Da sonst Neues dabei nicht auftritt, genüge die Betrachtung eines dieser Hilfsmittel, der „Interferenzplatte" (Abb. 52). Es ist dies eine sehr genau planparallele schlierenfreie Glasplatte PP, in welche das zu untersuchende Lichtbündel L schief eintritt, um dann im Inneren wiederholt hin und her reflektiert zu

---

[1]) Hätten die aufs Gitter fallenden Wellenfronten nicht die Breite der verdoppelten, sondern nur der einfachen Spaltenzahl, so könnte die Verdoppelung keine neuen Auslöschungen hervorbringen; die Helligkeit würde dann überall gleichmäßig nur aufs Doppelte wachsen, und die Verschärfung der Spektrallinien bliebe aus. Man hat somit an der Beschaffenheit der Erscheinung ein Zeichen für die Breite der vorhandenen Wellenfronten.

[2]) Gewöhnlich ist das blauviolette Ende im Prismenspektrum viel mehr auseinandergezogen (dispergiert) als das rote. Es entspricht dies dem zunehmend steilen Anstiege der Linie n von links her in Abb. 38 (88).

werden, wie es die Abbildung zeigt. Das aufgekittete Prisma p dient zur Vermeidung von großem Reflexionsverlust beim Eintritt des Lichtes in die Platte. Bei jeder Reflexion tritt ein Teil des Lichtes auch aus, und diese austretenden Teile fallen zusammen ins Objektiv O des Beobachtungsfernrohres. Es kommen unter den Strahlen dieses in der Brennebene des Objektives interferierenden Bündels sehr große Gangunterschiede in zunehmenden Stufen vor; die Stufe ist roh durch die doppelte Glasdicke gegeben, beträgt also sehr viele Wellenlängen. Man kann daher hier Spektren sehr hoher Ordnungen erwarten. Es gelten hier auch alle Überlegungen für die Berechnung der Interferenzen, wie bei den Gitterspektren, obgleich hier Beugung überhaupt nicht wirksam wird, da begrenzte Öffnungen nicht vorkommen; die Gangunterschiede entstehen in der angegebenen anderen Weise. Die Reinheit der Spektren hängt wieder mit der Zahl der Stufen zusammen, welche hier allerdings zu wünschen übrig läßt, da die nach öfterer Reflexion austretenden Strahlen bald sehr schwach werden. Man läßt übrigens den Lichteintritt viel schiefer erfolgen als in Abb. 52 gezeichnet, nahezu streifend sogar, weil dann die Gangunterschiede möglichst groß werden, zugleich auch die Richtungsunterschiede des Austritts der Strahlen wachsen, die in etwas verschiedener Richtung eingetreten sind. Diese Richtungsunterschiede des Austritts ergeben nämlich die spektrale Zerlegung im Gesichtsfeld des Fernrohres; denn verschiedener Richtung des Strahlenlaufes in der Platte entspricht auch ein veränderter Gangunterschied. Das Vorhandensein genügend verschiedener Eintrittsrichtungen ist von selber durch die stets endliche Breite des Kollimatorspaltes gegeben.

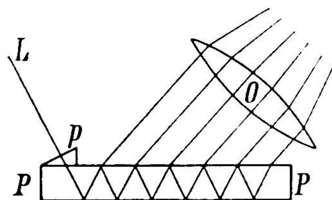


Abb. 52. Interferenzplatte.

Entsprechend der hohen Ordnung der erscheinenden Spektren findet auch stark gehäufte Überdeckung verschiedener Ordnungen statt; es ist daher gesichert deutbare Beobachtung nur möglich, wenn schon vorher spektral zerlegtes, nahe monochromatisches Licht benutzt wird. Man kann z. B. eine einzelne Emissionslinie mit ihrer allernächsten Umgebung aus dem durch ein Prisma entworfenen Spektrum ausblenden, um dann mittels des Interferenzspektroskopes die feinere Beschaffenheit dieser Linie zu untersuchen.

Mittels Interferenzspektroskopen ist es beispielsweise gelungen, die Serienlinien des Lithiums als doppelt zu erkennen, gleich den Linien der anderen Alkalien (vgl. 82, Abb. 36), jedoch mit so geringem, dem kleinen Atomgewicht des Lithiums entsprechenden Linienabstand, daß Prismenapparate und Gitterspektren niederer Ordnung zur Trennung nicht ausreichen. Auch die Linien des Wasserstoffs zeigten sich doppelt, und der sehr geringe Linienabstand (bei der roten Wasserstofflinie $^1/_{60}$ des Abstandes der D-Linien des Natriums) war meßbar. Überhaupt findet man bei Zerlegung mittels der Interferenzspektroskope kaum eine Spektrallinie, die nicht mindestens einige schwächere Begleitlinien zeigte.

159. Sonstige Beugungserscheinungen. — Das für die Gitter charakteristische Zusammenwirken vieler gleichgestalteter Öffnungen mit dem Ergebnis besonders ausgeprägter und lichtstarker Beugungserscheinungen findet man auch in anderen Fällen wieder. So zeigen die flächenhaft regelmäßig verteilten Öffnungen feiner Gewebe oder Drahtnetze prachtvolle Beugungsspektren schon wenn man sie einfach vors Auge hält, das nach einer möglichst punktförmigen Lichtquelle blickt (147). Der zweidimensionalen Öffnungsanordnung entsprechend erstrecken sich diese Spektren über die ganze Fläche des Gesichtsfeldes; der weiße anvisierte Punkt, der als Mitte der Erscheinung unverändert sichtbar wird, ist allseits von den radial nach außen gerichteten Spektren der verschiedenen Ordnungen umgeben, alle mit ihren violetten Enden dem Mittelpunkt zugewendet. Ebenso bemerkenswerte, wohlentwickelte Beugungsspektren zeigen die Flügelfedern kleiner Vögel zum Zeichen der großen Feinheit und dabei genauen Gleichmäßigkeit ihres Aufbaues.

Wie ebene Gitter wirken sehr kurzwellige Schallwellenzüge in Flüssigkeiten, die quer durch ein paralleles Lichtbündel gehen. Die Verdichtungen und Verdünnungen in der

Flüssigkeit zerstreuen vermöge der Brechungsquotientenänderung mit dem Druck das Licht und wirken dabei wie Gitterstäbe. Man erhält so mit Schallwellenlängen unter 0·1 mm, wie sie schwingende Kristallplatten liefern (A 102), wohlausgeprägte Beugungsspektren[1]).

So wie Öffnungen wirken auch kleine Schirme in Vervielfältigung. Ihre genaue Wiederholung in großer Zahl ergibt bei unregelmäßigen Abständen nicht Gitterwirkung, sondern dasselbe Beugungsbild wie die einzelne Öffnung, bzw. der einzelne Schirm, nur in erhöhter Intensität bzw. Farbensättigung. So sieht man durch eine mit den sehr gleichmäßig großen Bärlappsamenkörnern bestäubte Glasplatte wohlentwickelte farbige Ringe um eine punktförmige Lichtquelle. Die ebenso entstehenden, bekannten Mondringe lassen den Schluß zu, daß der vorhandene Wolkenschleier aus lauter gleichgroßen Wassertröpfchen besteht. Ist der Durchmesser des innersten roten Ringes 1° (doppelte Vollmondsbreite), so haben die Tröpfchen 0·04 mm Durchmesser; bei doppelt so großem Ring sind sie halb so groß. Auch der Regenbogen ist merklich von Beugungserscheinungen begleitet, und er wird ganz zu solchen, wenn die Regentropfen sehr klein sind.

160. Kristallspektroskopie. — Die künstlichen Beugungsvorrichtungen versagen, wenn man sie für die 1000- und mehrmal kürzeren Wellen der Hochfrequenz- oder γ-Strahlen (siehe 98, Abb. 39) benutzen wollte; die Erscheinungen werden (bei nicht sehr schiefem Einfall) entsprechend klein. Es treten für so kurze Wellen — passend und sehr einfach — gewöhnliche feste Körper mit ihrem Aufbau aus den entsprechend kleinen und gleichmäßigen Atomen oder Molekülen an Stelle der künstlichen Gitter als Interferenzplatten oder höfebildende Schirme. Besonders Kristalle eignen sich dazu, weil in ihnen die Moleküle nicht nur alle gleich, sondern auch gleichgerichtet und mit vollkommen regelmäßiger Folge der Atome — gittermäßig — angeordnet sind. Man wußte genug von Atom- und Molekülgrößen und vom Kristallbau (vgl. M 249, W 103), um die ursprünglich nur vermutete Wellennatur der genannten Strahlen durch Beugungsversuche an Kristallen auf die Probe stellen zu können. Einige Mühe macht die Deutung beobachteter Erscheinungen nach den übrigens von den Gittern her bekannten Grundsätzen insofern, als hier dreidimensionale und daher verwickeltere Anordnungen in Betracht kommen. Hieraus hat sich mit den am sichtbaren Licht schon erlangten Kenntnissen über Beugung und Interferenz, die wir im Vorhergehenden behandelt haben, eine Fülle von Wissensstoff entwickelt, ohne daß allerdings in Bezug auf die Wellen im Äther grundsätzlich Neues aufgetaucht wäre außer der Sicherheit, daß es Ätherwellen von solcher Kürze wirklich gibt[2]). Wohl aber hat sich aus Beobachtung und Vermessung reiner Beugungsspektren der von erregten Atomen ausgesandten Hochfrequenzstrahlen (81) erweiterte Kenntnis über das Atominnere ergeben, worauf wir später in geeignetem Zusammenhang eingehen (E 502, 542, 544).

---

[1]) Benützt man stehende Schallwellen, die ein intermittierend vorhandenes Gitter sind, so ist auch das abgebeugte Licht intermittierend und zwar — wie leicht einzusehen — mit der doppelten Schallfrequenz. Solches vielmillionenmal in der Sekunde intermittierendes Licht gibt feine Anwendungsmöglichkeiten, z. B. zu Lichtgeschwindigkeitsmessung auf sehr kurzen Strecken.

[2]) Die zur Berechnung der Wellenlängen nötige Kenntnis der Atom(mittelpunkts-)abstände war bei einfach gebauten Kristallen (wie NaCl) aus den absoluten Atomgewichten (W 102, 104) und dem spezifischen Gewicht sogleich erhältlich (vgl. W 106).

Auch waren andererseits die Beugungserscheinungen an Kristallen ein Mittel des Vordringens zu Einzelheiten über den Aufbau der benutzten Kristalle aus den Atomen (M 249) auch in verwickelteren Fällen. Es versteht sich, daß bei allen diesen Untersuchungen — wie schon bei Erforschung des langwelligen Ultraviolett (98) — die photographische Platte an Stelle des bloßen Auges zu treten hatte[1]).

161. Größe der Wellenfronten. — Wenn jedes leuchtende Atom in den Lichtquellen allseitig, d. i. in Kugelwellen strahlte, so würden Grenzen der ausgesandten Wellenfronten, mit Unterbrechung der Phasengleichheit auf ihnen, nicht zu erwarten sein. Daß, entsprechend den stets sehr vielen Atomen auch punktförmiger Lichtquellen, stets sehr viele solche Kugelwellenzüge, bei weißem Licht auch von sehr verschiedenen Wellenlängen, übereinander gelagert sich finden müßten, dies würde die zu erwartenden Interferenz- und Beugungserscheinungen nicht stören können, ebensowenig wie die Phasensprünge, welche am Ende jedes kohärenten Wellenzuges mit Beginn eines neuen solchen einsetzen, wenn nur jeder einzelne dieser Kugelwellenzüge die seiner Wellenlänge zugehörige Erscheinung hervorbringt. Mit solcher ungestörter Übereinanderlagerung stimmen auch alle Beobachtungen überein. Ob aber die ununterbrochen gleichphasigen Einzelwellenfronten volle Kugeln sind, ist fraglich. Es wären nur Stücke von kugeligen Wellenfronten zu erwarten, wenn die Atome wie große elektrische Oszillatoren sich verhielten, die nicht allseitig gleichmäßig, sondern vorzugsweise nur in je einer Ebene strahlen (vgl. E 421). Es könnte aber — bei der großen Unkenntnis vom Zustandekommen der Lichtwellen der Atome — sogar ganz einseitige Ausstrahlung von je einem Atom erwartet werden, etwa entsprechend dem quantenmäßigen Arbeiten der Atome (vgl. 115, aber auch 165), indem man für jedes ausgestrahlte Quant einen seitlich schmal begrenzten, das Atom verlassenden Wellenzug annehmen könnte.

Die Beobachtung zeigt, daß solche Ausstrahlung in schmalen Bündeln mit kleinen Fronten bei den vielatomigen Lichtquellen nicht zutrifft. Man hat sogar bisher noch keine Grenzen in der Breite der einheitlichen Wellenfronten gefunden, die bei allen Berechnungen von Interferenz- und Beugungserscheinungen unbegrenzt vorausgesetzt werden, wie im Vorhergehenden wiederholt bemerkt (133, 156). Würden die bei irgendeiner beobachteten Erscheinung vorhandenen Wellenfronten nicht die volle Größe der wirksamen Teile der benutzten Vorrichtung haben, so daß von allen diesen Teilen Einzelwellen in gleicher Phase ausgehen, so würde dies durch eine mit der Berechnung nicht übereinstimmende Erscheinung sich zeigen müssen, und solche Nichtübereinstimmungen sind bisher nicht festgestellt. Im einzelnen ist dieser Gegenstand allerdings zu wenig untersucht; doch kann man nach den vorhandenen Beobachtungen zumindest Grenzwerte für sicher festgestellte Breiten von Wellenfronten angeben. Wenn z. B. Gitter, die man mit Gesamtbreiten bis fast 10 cm benützt hat, ihre volle berechnete Wirkung tun, so sind dabei einheitliche Wellenfronten von 10 cm oder größere Breite tatsächlich vorhanden (vgl. die Note zu 156). Die größte, festgestellte Wellenfrontbreite ist aus den Fixsternbeobachtungen zu

[1]) Die so gewonnenen Kenntnisse über Kristallbau sind noch nicht genügend in allen Zusammenhängen nachgeprüft (vgl. 3. Fußnote zu W 106).

schließen (154), bei welchen die an Stelle der Lichteinlaßöffnungen benutzten Spiegel bis auf 15 m Abstand gebracht wurden, ohne daß die zugehörigen Beugungserscheinungen verschwunden wären. Dies zeigt nicht nur sehr kleine Winkeldurchmesser der betreffenden Fixsterne an, sondern auch daß in ihrem Lichte Wellenfronten — bei dem großen Abstand Ebenen — mindestens von 15 m Breite mit einheitlicher Phase vorhanden sind.

Energiewegweisung.

162. Interferenz und Energiegesetz. — Es ist Eigentümlichkeit von Wellenzügen aller Art, daß gleichzeitiges Vorhandensein solcher am selben Orte nur wie Übereinanderlagerung derselben wirkt; sie können dann, nach Überschreitung des Ortes der Übereinanderlagerung, wieder getrennt weiter sich fortpflanzen, ohne gestört worden zu sein. Es zeigte dies beim Lichte schon die Lochkammer, in deren Öffnung sämtliche Wellen, die das ganze Bild ausmachen, ohne Störung sich kreuzen und übereinanderlagern (13). Was dabei am Orte der Übereinanderlagerung geschieht, ist Zusammensetzung der von den einzelnen Wellen her im Medium wirkenden Kräfte nach dem Parallelogrammsatz, dessen Sinn eben die gegenseitige Nichtstörung dieser Kräfte ist (M 44, 45).

Der besondere Fall dieser Zusammensetzung, den wir im Vorhergehenden ausführlich betrachtet haben, die Interferenz, bestand darin, daß die Kräfte der beiden Wellenzüge an bestimmten Orten ihres Zusammentreffens dauernd die Resultierende Null ergeben. Die beiden Wellenzüge überschreiten dann einen solchen Ort auf gemeinsamen Wegen überhaupt nicht, wovon wir sogleich einen besonderen Fall betrachten (163). Da aber Wellen stets Energietransport bedeuten (A 19), ist nach dem Verbleib der Energie der beiden in solcher Weise verschwundenen Wellenzüge zu fragen. Die Antwort fällt in Übereinstimmung mit dem Energiegesetz dahin aus, daß der Energie durch Interferenz nur andere Wege gewiesen werden, als welche sie ohne Interferenz gegangen wäre, so daß sie eine andere räumliche Verteilung erhält, ohne aber ihre Gesamtmenge zu ändern. Wir haben dies für die Schallwellen, wo es sich nur um Bewegungen und Drucke in der Luft handelt, in einigen Fällen eingehend betrachtet (A 74—80). Das Folgende zeigt entsprechende Beispiele beim Licht.

163. Interferenz als Energiewegweiser auch beim Licht. — Ein besonderes Beispiel bietet Newtons Farbenglas. Wir sahen bei Vergleichung der Erscheinung im reflektierten und im durchgelassenen monochromatischen Licht (125, 126, 130, Abb. 44 und 46), daß (abgesehen von dem Überschuß unverändert durchgehenden Lichtes) alle Stellen, die im reflektierten Licht dunkel erscheinen, im durchgelassenen hell sind, und umgekehrt. Es geht also bei wachsender Schichtdicke die Lichtenergie abwechselnd zurück und durch, und ob das eine oder das andere stattfindet, ist ganz durch die Interferenzen bestimmt. Dabei sind es in beiden Fällen dieselben Strahlen, die interferieren und um deren Energie es sich handelt, nämlich die im Punkte c (Abb. 44 und 46) zusammenkommenden beiden Strahlen 1 und 2, und die Interferenz bestimmt es, ob die im Punkte c zusammenkommende Energie nach oben oder nach unten

weitergeht (cA in Abb. 44 bzw. ceA in Abb. 46).[1]) Dabei ist besonders bemerkenswert, daß die Reflexion bei c, welche am dichteren Medium die Phase umkehrt, ganz unterbleibt — samt der Umkehr —, sobald diese Umkehr zu entgegengesetzten Phasen führen würde.

Man hat hier ein auffallendes Beispiel von Wegweisung der Wellenenergie durch Interferenz.

Bei Fresnels Spiegeln und ebenso bei der Beugung durch ein Öffnungspaar sahen wir ähnlich das Zusammenlaufen der elektrischen Energie in den dort angegebenen Hyperbeln (149), ebenfalls gewiesen durch die Interferenz. Bei Gittern von genügender Feinheit und geeigneter Spaltbreite kann es vorkommen, daß fast alle Lichtenergie außer in den mittleren Strahl sehr stark seitwärts, etwa in die 2. Ordnung geworfen wird, als wäre hier eine besondere Beugungswirkung vorhanden, was aber wieder nur — wie ersichtlich gemacht (156) — aus Interferenzgründen erfolgt.

164. Ein scheinbarer Widerspruch mit dem Energiegesetz bei Übereinanderlagerungen von Wellenzügen mag vielleicht besonders erklärungsbedürftig sein. Es gibt nämlich die Übereinanderlagerung zweier Wellenzüge in gleicher Phase bei gleicher Amplitude die doppelte Amplitude, was aber nicht die doppelte sondern die vierfache Energie bedeutet; denn Intensität, d. i. Energie von Wellen ist immer proportional dem Quadrat der Amplitude (A 44, E 123). Es würden danach zwei Energiemengen zusammen nicht ihre Summe, sondern mehr ergeben, was dem Energiegesetz widerspräche. Der Widerspruch löst sich dadurch, daß beim Zusammenwirken von Wellenzügen — seien es auch die Einzelwellenzüge nach Huygens Prinzip — stets nicht nur gleiche, sondern auch entgegengesetzte Phasen zusammenkommen, deren regelmäßige Abwechselung eben den Wellenzug ausmacht, und daß die Energien der entgegengesetzten Phasen sich vermindert summieren, bei entgegengesetzter Gleichheit der Phasen sogar mit dem Ergebnis Null. Es verschwindet dabei an den Stellen solcher Auslöschung ebensoviel Energie, als an den Stellen der Verstärkung vermehrt erscheint, so daß nur Verschiebungen der Energie vorkommen. Die starke Häufung der Energie in den schmalen Spektrallinien der vielspaltigen Gitter, verbunden mit dem Auftreten vermehrter Auslöschungsstellen (155), war ein besonders betrachtetes Beispiel hiervon. Ein andersartiges Beispiel boten die Schwebungen der Schallwellen (A 74).

Solche abwechselnde Häufungen und Minderungen der Energie können übrigens bei keiner Übereinanderlagerung von Wellenzügen fehlen; nur werden sie gewöhnlich nicht merklich, weil sie räumlich und zeitlich zu schnell wechselnd einander folgen, wenn die zusammenkommenden Wellenzüge nicht genau gleiche Wellenlänge und gleiche Phasenwechsel nach jeder Kohärenzlänge (129) haben. Eben letztere Bedingung zeigt sich bei Wellenzügen, die nicht von ein und demselben Atom (von einer und derselben zusammen emittierenden Atomgruppe, vgl. 165) ausgehen, unerfüllt, was bei der gegenseitigen Unabhängigkeit der Bedingungen, unter welchen weit voneinander entfernte Atome zur Lichtemission kommen, auch nicht anders zu erwarten ist. Lichter verschiedener Lichtquellen „interferieren nicht", d. h. sie geben keine sichtbaren Interferenzerscheinungen. Dies war schon bei Fresnels Spiegelversuch zu erwähnen (133).

165. Auch in den Lichtquellen selbst ist Interferenz als Energiewegweis gültig zu erwarten. — Man denke zwei Atome zur Lichtemission erregt, d. h. mit dem nötigen Energiezuschuß versehen (115) und nehme an, sie würden mit Aussendung gleicher Wellenlängen so beginnen, daß ihre Einzelwellenzüge mit entgegengesetzt gleichen Phasen nach derselben Richtung hin laufend sich überlagerten, so würde dies die gegenseitige Vernichtung dieser Einzelwellenzüge ergeben. Das aber bedeutet nach den gemachten Bemerkungen über die Energiewegweisung, daß nach dieser Richtung hin überhaupt keine

[1]) Schon Newton hat diese abwechselnd verschiedenen Wege des Lichtes an seinem Farbenglas festgestellt. Er zeigte, daß sie wie abwechselnd leichtere Reflektierbarkeit und leichtere Brechbarkeit des Strahles gedeutet werden könnten.

gleichzeitige Emission der beiden betrachteten Atome stattfinden wird, sondern daß die Atome, deren Wellenzüge gleiche Wege nehmen, auf Emission mit Phasenvereinigung sich einrichten werden. In dieser Weise ist gruppenweises Zusammenwirken nicht zu weit voneinander entfernter Atome in den Lichtquellen zu erwarten.

So wenig man über das Hervorgehen der Lichtwelle aus dem Atom weiß, so ist doch solches gruppenweises Zusammenwirken schon aus den Größenverhältnissen von Lichtwelle und Atom zu erwarten. Schon die halbe Wellenlänge sichtbaren Lichtes hat rund die 1000fache Größe des Atomdurchmessers (W 106), und eine entsprechende Breite der Wellenfront kann nicht fehlen. Die emittierte Welle ist also ein gewaltig großes Gebilde neben dem winzigen Atom, aus welchem sie hervorgeht. Schon die erste emittierte Halbwellenlänge reicht in einer festen oder flüssigen Lichtquelle über rund 1000, in einem Gase von Atmosphärendruck über rund 100 Nachbaratome oder Moleküle, und es ist daher nicht zu verwundern, wenn dieselben zur Mitwirkung kommen[1]).

Das gruppenweise Zusammenwirken der Atome bei der Lichtemission macht es auch verständlich, daß im fertigen Lichte trotz der quantenmäßigen Beiträge der einzelnen Atome oder Moleküle (W 181, 182) nichts von quantenmäßiger Unterteilung (nichts von „Lichtquanten", sogen. „Photonen") zu bemerken ist (161), sondern daß nur die den wohluntersuchten Interferenz- und Beugungserscheinungen entsprechenden Wellenfronten und kohärenten Wellenzüge vorhanden sich zeigen.

Es kann das anders sein bei den sehr kurzwelligen Hochfrequenz- und γ-Strahlen, deren Gesamtenergie im Verhältnis zum großen Energiequant so schnellperiodischer Vorgänge stets viel kleiner ist als beim sichtbaren Licht und an deren Emission dementsprechend auch nicht so viele Atome gleichzeitig beteiligt sind. Bei den γ-Strahlen liegen auch besondere Anzeichen dafür vor, daß vereinzelte Atome einzeln sie aussenden (E 552). Es sind dann gesonderte Energiequanten (als kohärente Wellenzüge) in der Strahlung zu erwarten, deren Vorhandensein durch besondere Eigenheiten ihrer lichtelektrischen Wirkung auch nachgewiesen ist („Compton-Effekt", s. E 473).

Wie bei der Emission, so zeigt sich auch bei der Absorption des Lichtes ein Hinauswirken der Atome in ihre Umgebung. Mit großen Zwischenräumen verteilte absorbierende Atome fangen viel mehr Licht auf als ihrem Querschnitt entspricht (haben große absorbierende Querschnitte); sind sie aber dicht gelagert, so beeinträchtigen sie sich gegenseitig in der Absorption, so daß diese nicht mehr der Atomzahl in der Volumeinheit proportional ist. Dies ist besonders bei den metallhaltigen, lichtemittierenden und absorbierenden Zentren der Phosphore (109) bemerkbar geworden.

---

[1]) Es ist ein Zusammenhang zu erwarten zwischen der Größe der aussendenden Atomgruppen und dem Energieinhalt der von einheitlichen Wellenzügen erfüllten Volume der ausgesandten Strahlung. Diese Volume sind durch die nachgewiesenen Wellenfrontbreiten (161) und Kohärenzlängen (129) gegeben. Der Energieinhalt eines solchen Volums würde so viele Energiequanten betragen, als Atome bei der Aussendung beteiligt waren. Soviel man weiß, enthält eben gut sichtbares Licht einer gelben Natriumlinie etwa 10^{-13} erg im m^3; 10000mal soviel, 10^{-9} erg/m^3 ist sehr intensiv, und dies wären in der Tat rund 250 Energiequanten im m^3, wie es dem Zusammenwirken vieler Atome entspricht.

c) Polarisation.

166. Längs- und Quer-Wellen. — Durch das Bisherige ist es sichergestellt, daß das Licht ein Wellenvorgang ist; Ausbreitungsgeschwindigkeit und Wellenlängen sind gut bekannt. Es bleiben aber viele Fragen übrig in Bezug auf die Art dieser Wellen im Äther. Eine dieser Fragen war frühe schon beantwortbar geworden; es ist die für aller Art Wellen immer nächstliegend gewesene Frage: Ob sie Längswellen sind, wie die Schallwellen in der Luft, oder Querwellen, wie die Wellen an einem Seil oder einer Saite?

Der gegensätzliche Unterschied zwischen Längs- und Quer- (Longitudinal- und Transversal-) Wellen wurde eingehend bei der allgemeinen Wellenbetrachtung behandelt (A 10); Abb. 53 zeigt hier nochmals die Hauptsache an

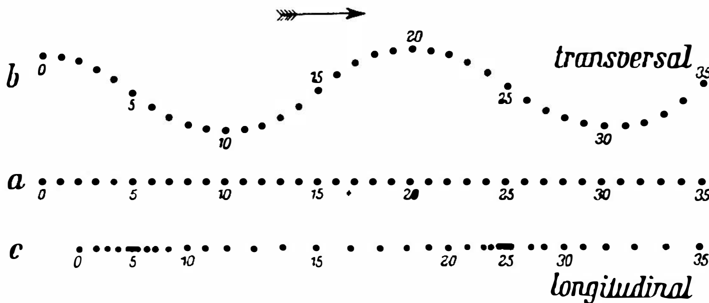


Abb. 53. Quer- und Längswelle.

gewöhnlichen (mechanischen) Wellen einer Punktreihe (a): Es kommt darauf an, ob die Schwingungen der Welle senkrecht (quer) zur Fortpflanzungsrichtung stattfinden (b, wie bei einer Seilwelle) oder in (längs) der Fortpflanzungsrichtung (c, wie bei einer Schallwelle). Kann man das Schwingen in der Welle nicht unmittelbar verfolgen, um die Schwingungsrichtung zu sehen, so kann man doch in einfacher Weise die Längs- oder Querfrage dadurch entscheiden, daß man auf Einseitigkeit rings um die Ausbreitungsrichtung, um den Strahl achtet, auf Vorhandensein von Besonderheiten in einer der Richtungen senkrecht zum Strahl.

Die Querwelle hat solche Einseitigkeit; denn die Schwingungsrichtung steht senkrecht zum Strahl, und dadurch ist schon eben diese Richtung unter allen anderen Richtungen senkrecht zum Strahl ausgezeichnet. Man kann daher erwarten, daß die Querwelle ein anderes Verhalten in ihrer Schwingungsebene zeigt als senkrecht dazu. Die Längswelle dagegen kann Einseitigkeit unmöglich zeigen; denn alles was in ihr vorgeht ist auf die Linie der Ausbreitung, den Strahl selbst beschränkt; es kommt keine gerichtete Größe in Betracht, deren Richtung (wie die von Verschiebungen oder Geschwindigkeiten oder elektrischen Kräften) eine Komponente senkrecht zum Strahl hätte, wodurch eben diese Querrichtung ausgezeichnet wäre.

167. Polarisiertes Licht. — Wird somit ein Lichtstrahl gefunden, der Einseitigkeit zeigt, so kann er jedenfalls keine reine Längswelle sein; er muß mindestens einen queren Anteil haben (wie die Wasserwelle) oder reine Quer-

welle sein (wie die Seilwelle). Solches einseitiges Licht gibt es aber wirklich; man nennt es „polarisiertes Licht". Schon Huygens hat das gefunden (1676), als er die im Kalkspat gebrochenen Lichtstrahlen untersuchte. Malus hat später gefunden (1808), daß solches einseitiges Licht sehr einfach bei der gewöhnlichen Reflexion, z. B. an einer Glas- oder Wasseroberfläche entsteht, sowie daß die Einseitigkeit durch solche Reflexion auch einfach nachgewiesen werden kann.

Der Verfolg dieser Untersuchungen (168—171 u. f.) hat gezeigt, daß es einseitiges, transversales Licht nicht nur gibt, sondern daß alles Licht transversal ist.

168. Nachweisung polarisierten Lichtes. — Es wird gut sein, vor allem diesen Nachweis und somit überhaupt eine Äußerung von Einseitigkeit eines Lichtstrahls zu betrachten. Es sei der zu prüfende Strahl lotrecht nach abwärts gerichtet; wir stellen ihm einen geeignet geneigten Spiegel entgegen, durch welchen er nach Belieben sowohl nach vorn oder hinten als auch nach rechts oder links hin gespiegelt werden kann, was leicht ausführbar ist, wenn der Spiegel um eine lotrechte Achse drehbar ist.

Gelingt die Spiegelung z. B. nach vorn und nach hinten, versagt sie aber nach den anderen beiden Seiten, nach rechts und links, so ist die Einseitigkeit nachgewiesen; der Strahl ist als „polarisiert" gezeigt. Ein solcher Strahl muß querschwingend sein (166).

169. Schwingungsebene. — Die einfachste Annahme über die Natur eines solchen polarisierten Strahls ist diese, daß er in einer einzigen bestimmten Richtung senkrecht zum Strahl schwinge; man weiß nur nicht: schwingt er etwa in der Richtung, in welcher er sich spiegeln läßt und in der anderen senkrechten Richtung nicht, oder ist es umgekehrt. Beides würde mit der beobachteten Bevorzugung der einen Richtung vor der anderen stimmen. Die hier vorliegende Unsicherheit hat lange gewährt, bis erkannt wurde (Hertz, 1888), daß im Licht elektrische Wellen vorliegen, die in beiden aufeinander und zum Strahl senkrechten Richtungen[1]) schwingen, jedoch in verschiedener Weise: in der einen Richtung elektrisch, in der anderen magnetisch, wie wir es bereits von vornherein angegeben haben (3). Die Verschiedenartigkeit dieser beiden, in Ätherwellen stets miteinander verbundenen Schwingungen macht die Einseitigkeit des polarisierten Strahles aus. Abb. 1 zeigte schon die drei aufeinander senkrecht stehenden Richtungen: Elektrische Kraft, magnetische Kraft und Strahl, perspektivisch dargestellt, dazu die wellenförmige Größen- und Richtungsverteilung der elektrischen Kraft durch die Wellenlinie angedeutet. Wir kommen eingehend und mit Begründung in der Elektrizitätslehre darauf zurück (E 430).

Um in einfacher Weise eine eindeutige Angabe über einen polarisierten Strahl zu machen, spricht man nur von der elektrischen Schwingung und nennt Schwingungsebene des Strahls die durch den Strahl gelegte Ebene, in welcher die elektrische Schwingung senkrecht zur Strahlrichtung vor sich geht (Zeichnungsebene von Abb. 1). Die bevorzugte Beachtung der elektrischen

[1]) Das Entweder-Oder („tertium non datur") hat sich der Natur gegenüber öfter nicht bewährt; die Natur ist meist noch anders als man vermutete. So auch bei der Frage, in welcher Ebene das polarisierte Licht schwinge. Es schwingt weder nur in der einen noch in der anderen Richtung, sondern es schwingt in beiden Richtungen.

Schwingung ist dadurch begründet, daß es die elektrischen, nicht die magnetischen Kräfte des Lichtes sind, welche dessen Sichtbarkeit, sowie auch die photographischen und die anderen chemischen Wirkungen bedingen (92, 101, E 431).

170. Unpolarisiertes Licht. — Führt man den Spiegelungsversuch (168) mit Licht aus, das unmittelbar von der Sonne kommt oder von irgend einer der gewöhnlichen Lichtquellen — was alles heiße Körper sind —, so findet man keinerlei Einseitigkeit: Das „natürliche" Licht ist unpolarisiert. Mangels Einseitigkeit könnte dieses Licht auch longitudinal sein; doch ist auch eine andere Erklärung möglich, nämlich Transversalität, wie beim polarisierten Licht, nur mit sehr schnellem Wechsel der Schwingungsebene, so daß die Einseitigkeit unmerklich geworden ist. Es ist kein Zweifel, daß die letztere Erklärung der Wirklichkeit entspricht. Jede vergleichende Beobachtung von natürlichem mit polarisiertem Licht zeigt dies; es kommen beiden Lichtern in gleicher Weise alle Lichtwirkungen zu, besonders auch für das Auge sind sie unmittelbar nicht von einander zu unterscheiden. Auch haben sie die gleiche Fortpflanzungsgeschwindigkeit[1]). Ferner entsteht polarisiertes Licht sehr leicht aus natürlichem, wie alsbald zu zeigen ist, und dies wäre unverständlich, wenn das natürliche Licht nicht schon transversal wäre. Außerdem ist von den heißen Körpern als Lichtquellen, d. i. Ätherwellen-Erzeugern, bei der Ungeordnetheit der Wärmebewegung ihrer Moleküle und Atome auch gar nichts anderes zu erwarten als ungeordnete Beschaffenheit der Wellen (vgl. 80), somit auch regelloser Wechsel der Schwingungsrichtung[2]). Endlich hat man gesichert als longitudinal erkennbare Ätherwellen bisher überhaupt immer nur vergeblich gesucht.

Daher ist festzuhalten: Polarisiertes Licht schwingt (elektrisch) nur in einer Richtung senkrecht zum Strahl; natürliches Licht schwingt schnell nacheinander in allen Richtungen senkrecht zum Strahl.

171. Teilweise polarisiertes Licht. — Daß unpolarisiertes Licht und polarisiertes Licht nicht so sehr verschiedene Vorgänge sind, wie longitudinale und transversale Wellen, dies zeigt sich auch daran, daß Übergänge zwischen beiden beobachtbar sind: teilweise polarisiertes Licht und das später (197) zu betrachtende elliptisch polarisierte Licht. Dieselben erweisen sich beim Spiegelungsversuch (168) ebenfalls einseitig, wie polarisiertes Licht überhaupt, jedoch im minderen Grade als das vollständig polarisierte Licht, welches allein vollständiges Versagen der Spiegelung in einer Richtung zeigen kann. Die Schwingungen teilweise polarisierten Lichtes gehen zwar in allen Richtungen senkrecht zum Strahl vor sich, jedoch mit ungleichen Amplituden. Die Richtung der größten Amplitude ist als seine (elektrische) Haupt-Schwingungsrichtung zu bezeichnen; senkrecht dazu steht die Richtung der kleinsten Amplitude.

172. Polarisation durch Spiegelung. — Wir betrachten jetzt die einfachste Entstehungsweise von polarisiertem Licht aus natürlichem, nämlich durch Spiegelung. Es kommen hierbei und im folgenden innere Eigentümlichkeiten

---

[1]) Die irdischen Lichtgeschwindigkeitsmessungen benutzen zumeist gespiegeltes, also mindestens teilweise polarisiertes Licht; Römers Messungsweise benützt natürliches Licht. Außerdem zeigt auch die Gleichheit der Brechung in unkristallisierten Körpern Gleichheit der Fortpflanzungsgeschwindigkeit bei polarisiertem wie bei unpolarisiertem Licht.

[2]) Bei möglichst geordneter Bewegung von Atomen oder Molekülen, wie in den Kanalstrahlen (E 517 u. f.) ist auch Aussendung polarisierten Lichtes beobachtet.

reflektierter und gebrochener Strahlen zur Betrachtung, die in der geometrischen Optik — wo in der Hauptsache nur nach dem Laufe der Strahlen gefragt wurde — ganz außer Beachtung geblieben sind.

Es falle auf die Grenzfläche F F (Abb. 54) eines durchsichtigen Körpers, z. B. einer Glasplatte, ein Strahl E natürlichen Lichtes, dessen allseitige, senkrecht zum Strahl stehende Schwingungen in der Abbildung (perspektivisch) angedeutet sind. Untersucht man den reflektierten Strahl R mit einem Spiegel· (168), so findet man, daß er polarisiert ist und zwar im allgemeinen teilweise.

Vollständige Polarisation findet man nur bei solchem Einfallswinkel α, daß der reflektierte Strahl R und der gebrochene G senkrecht aufeinander stehen, der angezeichnete Winkel in Abb. 54 somit 90° ist.

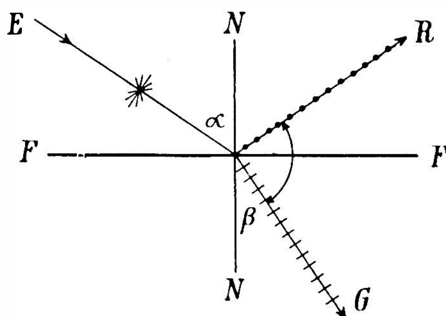


Abb. 54. Polarisation bei Reflexion und Brechung.

Bei senkrechtem Einfall ($\alpha = 0°$) fehlt die Polarisation ganz.

Wir setzen im folgenden im allgemeinen den Einfallswinkel vollständiger Polarisation voraus, „Polarisationswinkel" genannt·, er richtet sich — entsprechend jenem Winkel von 90° — nach dem Brechungsexponenten n[1]) und beträgt beispielsweise für Glas mit n = 1·5 rund 56°.

Die (elektrische) Schwingungsrichtung des reflektierten Strahls ist parallel der reflektierenden Fläche, somit senkrecht zur Einfallsebene; in der Abb. 54 ist dies durch Punkte dargestellt. Man ist dieser Schwingungsrichtung sicher durch Versuche mit Wellen großer Länge, die unmittelbar mit elektrischen Mitteln untersucht werden können (E 431)[2]).

Die Spiegelung wirkt hiernach auswählend (nicht abändernd) in Bezug auf die im ankommenden Strahl vorhandenen Schwingungsrichtungen. Die Schwingungsrichtung parallel der Spiegelfläche, d. i. senkrecht zur Einfallsebene, wird mehr gespiegelt als die in der Einfallsebene; letztere sogar gar nicht, wenn der Einfall unter dem Polarisationswinkel stattfindet. Die zwischenliegenden Schwingungsrichtungen des einfallenden Lichtes sind mit ihren Amplituden der elektrischen Kräfte nach dem Parallelogrammsatz in Komponenten dieser beiden Vorzugsrichtungen zerlegt zu denken, und diese Komponenten werden auswählend reflektiert.

173. Der Spiegel als Polarisator und Analysator. — Fällt bereits polarisiertes Licht auf den Spiegel, so wird es dementsprechend gut gespiegelt, wenn seine Schwingungsrichtung parallel dem Spiegel, d. i. senkrecht zur Einfallsebene ist, und nicht gespiegelt, wenn sie in der Einfallsebene liegt. Man sieht

---

[1]) Es muß für die angegebenen 90° nach dem Brechungsgesetz $\tan g\,\alpha = n$ sein.

[2]) Die Sicherheit ergibt sich aber auch aus der in Maxwells Gleichungen (Anhang E V a) zusammengefaßten allgemeinen Kenntnis über die elektrischen Vorgänge (s. die Berechnung unter 176).

daraus, wie der Spiegel ebensogut zur Untersuchung polarisierten Lichtes benutzt werden kann — als „Analysator" —, wie zur Erzeugung polarisierten Lichtes — als „Polarisator". Seine Anwendung als Analysator hatten wir schon vorangestellt (168); man macht dazu den Spiegel um eine mit dem Strahl E (Abb. 54) zusammenfallende Achse drehbar und läßt den zu untersuchenden Strahl in dieser Richtung E einfallen. Ist der Strahl polarisiert, so findet man bei Drehung des Spiegels um seine Achse, mit dem Auge oder einem Schirm dem reflektierten Strahl folgend, zweimal im Umkreis Verdunkelung und dazwischen zweimal größte Helligkeit. Ist der Strahl vollständig polarisiert, so ist die Verdunkelung eine vollkommene Auslöschung; ist er nur teilweise (oder elliptisch) polarisiert, so bleibt etwas Helligkeit übrig (171). Die Schwingungsrichtung des untersuchten Strahles ist parallel dem auf größte Helligkeit gestellten Spiegel. Unpolarisiertes Licht (und zirkular polarisiertes, 197) gibt nach allen Richtungen gleich gute Spiegelung.

174. Polarisation des gebrochenen Lichtes. — Da überwiegend nur die eine, zur Einfallsebene senkrechte Komponente der Schwingungen des auftreffenden unpolarisierten Strahles im reflektierten Lichte sich findet, so ist nach dem Energiegesetz zu erwarten, daß die andere, in der Einfallsebene liegende Komponente im eindringenden, gebrochenen Strahl sich finden wird. Dies trifft auch zu, wie die Beobachtung mit analysierendem Spiegel zeigt. Abb. 54 stellt dies durch die Querstriche am Strahl G dar; die Schwingungsrichtung liegt hier in der Zeichnungsebene, welche auch die Einfallsebene ist. Jedoch ist das eindringende oder auch durch eine Platte gegangene Licht niemals vollständig, sondern immer nur teilweise polarisiert, woraus man sieht, daß eine vollständige Sonderung der Schwingungsrichtungen in den reflektierten und in den durchgehenden Teil auch beim Einfall unter dem Polarisationswinkel nicht stattfindet. Im durchgelassenen Teil ist die Polarisation am stärksten bei streifendem Einfall ($\alpha = 90^0$); bei senkrechtem Einfall ($\alpha = 0^0$) fehlt sie gänzlich, wie im reflektierten Licht.

175. Plattensatz als Polarisator. — Wegen der nur teilweisen Polarisation des durchgehenden Strahls ist eine Glasplatte kein guter Polarisator oder auch Analysator. Sonst hätte sie gegenüber dem Spiegel den Vorteil, das Licht in ungeänderter Richtung zu belassen. Diesen Vorteil kann man mittels eines Plattensatzes, d. i. einer Anzahl (10 oder mehr) aufeinander gelegter Glasplatten nutzbar machen; es wird dabei die Polarisation einigermaßen vollständig, indem bei Durchsetzung der Platten jede neue Reflexion an einer der Grenzflächen wieder einen Anteil der unerwünschten Schwingungskomponente ins reflektierte Licht wegsondert. Da letzteres beim Einfall unter dem Polarisationswinkel am besten stattfindet (auch beim Austritt in dünneres Medium), wirkt der Plattensatz bei diesem Winkel am besten.

176. Berechnung der Polarisationen bei Reflexion und Brechung. — Da es ersichtlich geworden ist, daß die Wellen des Lichtes elektromagnetischer Natur sind, wie bereits in der Einführung zur Optik vorangestellt (3), müssen die soeben geschilderten, durch unmittelbare Beobachtung gegebenen Polarisationseigentümlichkeiten des reflektierten und gebrochenen Lichtes aus elektromagnetischer Kenntnis herleitbar sein. Dies trifft auch zu und befestigt dadurch in umfassendem quantitativem Zusammenhang alle dabei mitwirkenden, sehr verschiedenartigen Kenntnisse. Die in Betracht kommenden elektrischen Kenntnisse sind in einer für alle Fälle quantitativ anwendbaren Form zusammengefaßt in Maxwells Gleichungen (E 406, 426).

Der durchsichtige Körper, an welchem die Reflexion und Brechung stattfindet, ist für die gedachte Herleitung als elektrischer Nichtleiter anzusehen; denn in einem Leiter würde die Elektrizität durch die elektrischen Kräfte des Lichtes stark in Bewegung geraten, was großen Energieverlust, d. i. starke Lichtabsorption ergäbe, wie sie in den elektrisch gut leitenden Metallen, die

deshalb undurchsichtig sind, auch wirklich stattfindet[1]). In schlechten Leitern, wie Wasser oder Salzlösung, folgen die Elektrizitäten so schnellem Wechsel der elektrischen Kräfte, wie sie im Lichte stattfinden, nicht (vgl. E 401), weshalb dieselben hier mit Recht auch als Nichtleiter, wie Glas, behandelt werden können. Teile im Körper, die für die besondere Schwingungsdauer des Lichtes resonanzfähig wären, so daß sie dadurch in Mitbewegung gerieten und auswählende Absorption ergäben, kommen hier auch nicht in Betracht, so daß die Rechnung sogar einfacher ist als in dem früher betrachteten Falle solcher Absorption und der damit verbundenen Farbenzerstreuung (88). Wir nehmen dementsprechend nur die geringe Verschieblichkeit der Elektrizität an, die in jedem Nichtleiter vorkommt (E 17), die durch die Dielektrizitätskonstante (E 106) bemessen wird und deren Folge die Verringerung der Lichtgeschwindigkeit und damit die Lichtbrechung im betreffenden Körper ist, wie schon öfter erläutert (88, 135)[2]).

Für diesen Fall ergeben Maxwells Gleichungen, angewandt auf eine bereits polarisierte Ätherwelle, die in Tab. 40 verzeichneten, wegen ihres reichen Inhalts bei großer Einfachheit sehr bemerkenswerten Zusammenhänge. Ist E die Amplitude (größte elektrische Kraft) des einfallenden Strahls von der in der 1. Spalte angegebenen Schwingungsrichtung, so geben die beiden anderen Spalten die Amplituden gleicher Schwingungsrichtung im reflektierten und im gebrochenen Strahle an, wenn α und β die nach dem Brechungsgesetz sich richtenden Einfalls- und Brechungswinkel sind.

Tab. 40. **Amplituden reflektierter und gebrochener Wellen.**

Schwingungsrichtung	Reflekt. Amplitude	Gebroch. Amplitude
⊥ zur Einfallsebene	$-\mathrm{E}\cdot\dfrac{\sin(\alpha-\beta)}{\sin(\alpha+\beta)}$	$\mathrm{E}\cdot\dfrac{2\cos\alpha\sin\beta}{\sin(\alpha+\beta)}$
// zur Einfallsebene	$-\mathrm{E}\cdot\dfrac{\mathrm{tg}(\alpha-\beta)}{\mathrm{tg}(\alpha+\beta)}$	$\mathrm{E}\cdot\dfrac{2\cos\alpha\sin\beta}{\sin(\alpha+\beta)\cos(\alpha-\beta)}$

Fällt Licht anders gerichteter Schwingungsebenen ein, so zerlegt man seine Amplitude nach dem Parallelogrammsatz in die beiden aufeinander senkrechten Komponenten, auf welche die Tabelle sich bezieht, wendet die Tabelle auf diese Komponenten an und setzt die (nach Spalte 2 bez. 3) sich ergebenden Amplituden wieder zusammen[3]).

Fällt unpolarisiertes Licht ein, so ist dieses Verfahren auf jede einzelne Schwingungsrichtung anzuwenden, was aber auf dasselbe hinauskommt, als wenn man die Hälfte der einfallenden Gesamtintensität in der einen der beiden Hauptschwingungsrichtungen (Spalte 1), die andere Hälfte in der anderen schwingend annimmt.

Die wenigen Angaben der Tabelle enthalten alle schon erörterten Einzelheiten der Polarisation bei Spiegelung und Brechung (172—175) und zwar mit quantitativer Genauigkeit. Auch der Fall des Polarisationswinkels ($\alpha + \beta = 90^0$) ist einbegriffen. Sie geben auch die Gesamtmenge (den Intensitätsbruchteil) des reflektierten und des durchgelassenen Lichtes für durchsichtige Körper bei jedem beliebigen Polarisationszustand des einfallenden Lichtes und bei jedem Einfallswinkel richtig an, was auch den schon früher (37) erwähnten Sonderfall des senkrechten Einfalls mit umfaßt. Auch die Phasenumkehr bei Reflexion am optisch dichteren Medium ($\alpha > \beta$), welche wir bereits durch die schwarze Mitte von Newtons reflektierten Ringen angezeigt fanden

[1]) Die Rechnung kann aber auch für Körper, die wie Leiter sich verhalten oder die mitschwingende Teile enthalten und daher starke Absorption zeigen, durchgeführt werden; sie gibt dann richtigen Aufschluß über die Polarisationen an Metallspiegeln, die von etwas komplizierterer Art sind als die hier vorzugsweise behandelten an den durchsichtigen Körpern (vgl. 197).

[2]) Der Brechungsexponent ist in diesem Falle gleich der Quadratwurzel aus der Dielektrizitätskonstante (vgl. 88 und E 429).

[3]) Es ist nach Pythagoras' Satz klar, daß solche Zerlegungen und Zusammensetzungen von Amplituden bei aufeinander senkrechten Komponenten nichts an der Energie ändern, also dem Energiegesetz entsprechen.

(126), ist ersichtlich durch das negative Vorzeichen beider Schwingungsrichtungen im reflektierten Licht. Am optisch dünneren Medium ($\alpha < \beta$) fehlt sie; hier werden die Zeichen positiv.

Diese reichen Ergebnisse aus der Anwendung von Maxwells elektrischen Gleichungen auf den behandelten Fall der Lichtwellen könnten bei ihrer Übereinstimmung mit der Wirklichkeit schon für sich allein Vertrauen geben zur Naturwahrheit der benutzten Vorstellungen von den Lichtwellen, abgesehen von den sonstigen durchgreifenden Zusammenhängen mit aller übrigen, überhaupt dafür in Betracht kommenden Kenntnis.

Sehr bemerkenswert ist es, daß die Formeln der Tab. 40 mit ihrem staunenswert reichen Inhalt bereits von Fresnel zu einer Zeit angegeben wurden (1823), da die Kenntnis von den Ätherwellen noch ganz in den Anfängen war. Fresnel war von der einzigen damals erfaßbaren Vorstellung ausgegangen, daß der Äther in Bezug auf die Wellen des Lichtes wie ein elastischer fester Körper sich verhalte. Diese Vorstellung war gegeben durch die aus der Tatsache der Polarisation des Lichtes gefolgerte Erkenntnis der Transversalität der Lichtwellen (166—168), zusammen mit der Kenntnis, daß Transversalwellen nicht in Gasen und Flüssigkeiten, sondern nur in festen Körpern möglich sind (A 16). Freilich entstand dabei der Widerspruch, daß der Äther, der in Bezug auf die Wellen wie ein fester Körper sich verhalten soll, sonst keineswegs einem festen Körper, eher einem Gase gleicht[1]). Daß trotz dieses Widerspruches die richtigen Ergebnisse der Tab. 40 zu erhalten waren, dies ist mit heutiger Kenntnis dem Umstande zuzuschreiben, daß die für Ätherwellen geltenden Gleichungen der Elektrodynamik (Maxwells Gleichungen) in der Tat eine der Möglichkeit von Querwellen entsprechende Verwandtschaft mit den Bewegungsgleichungen für elastische feste Körper haben[2]). Wesentlich war auch Fresnels Geschick in der Einführung passender Annahmen für die „Verschiebungen" des Äthers an den Grenzflächen der reflektierenden und brechenden Körper[3]).

d) Kristalloptik.

Doppelbrechung.

177. Kristalle. — Wir haben bisher nur nichtkristallisierte Körper in ihrem Verhalten dem Lichte gegenüber betrachtet, Körper die nach allen Richtungen hin gleiche Eigenschaften haben, so auch gleiche Geschwindigkeit der Lichtausbreitung in ihnen. Es sind das Körper, in welchen die Moleküle ungeordnet gelagert sind. Bei geordneter Lagerung der Moleküle, so daß dieselben mit ihren ausgezeichneten Richtungen, die sie haben, alle parallel stehen, hat man einen Kristall (M 249), der auch als Ganzes eine ausgezeichnete Richtung hat, oder mehrere solcher, und der auch dem Lichte gegenüber in verschiedenen Richtungen im allgemeinen verschiedenes Verhalten zeigt, wie er beispielsweise auch je nach der Richtung verschiedene Festigkeit (Spaltbarkeit), verschiedenes Wärmeleitungsvermögen usw. hat.

178. Kristallsysteme. — Das auffallendste Besondere, was Kristalle dem Licht gegenüber zeigen, ist die Doppelbrechung. Es gibt dabei ein auftreffender Strahl zwei gebrochene Strahlen (vgl. Abb. 54a u. b). Doch sind hierbei und überhaupt im optischen Verhalten nicht alle Kristalle gleichartig. Es richtet

---

[1]) Dieser damals in der Entwicklung von der Kenntnis der Ätherwellen auftretende Widerspruch ließ zeitweilig — solange man meinte, den Äther mechanisch erklären zu müssen — die Kenntnisse von der Wellennatur des Lichtes überhaupt als unbefriedigend erscheinen. Man war zu Querwellen gekommen, für die es in einem durchaus nicht festen Medium, wie es der Äther ist, keine befriedigende mechanische Erklärung gab. Erst spät zeigte weiter zunehmende Kenntnis, daß der Äther überhaupt kein Mechanismus ist (4) und die Lichtschwingungen keine mechanischen Schwingungen sind, womit der vermeintliche Widerspruch verschwand.

[2]) Dies ist auseinandergesetzt im Anhang M V, 6 (Bd. I) und im Anhang E V b, 8 (Bd. IV).

[3]) Daß es nicht angeht, mit heutiger Kenntnis noch immer von „Verschiebungen des Äthers" zu reden, wurde schon eingangs vermerkt (3).

sich dies nach den 6 Kristallsystemen, in welche man alle Fälle von Kristallen einordnen kann, nämlich: Regulär, Quadratisch, Hexagonal, Rhombisch, Monoklin und Triklin. In optischer Beziehung ordnen sich diese 6 Systeme in 3 Gruppen:

1. die regulären Kristalle, wie die Würfel des Steinsalzes und Sylvins; die Oktaeder und andere Formen des Flußspats, des Diamants. Sie verhalten sich wie nichtkristallisierte Körper, sie zeigen keine Doppelbrechung.

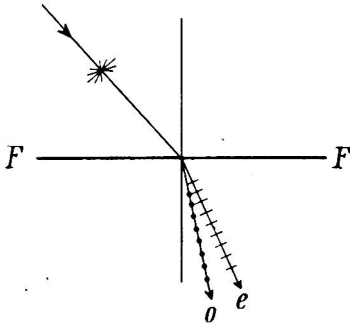


Abb. 54 a. Polarisation bei Doppelbrechung.

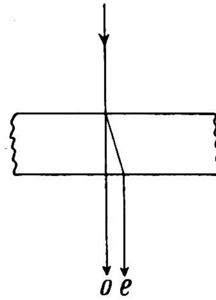


Abb. 54 b. Sonderfall von Doppelbrechung.

2. die quadratischen und hexagonalen Kristalle sind doppelbrechend mit einfachem Verhalten; sie sind „optisch einachsig". Hierher gehört der Bergkristall mit seinen sechsseitigen Säulen und der Kalkspat mit seinen Rhomboedern (Abb. 55).

3. die rhombischen, monoklinen und triklinen Kristalle, ebenfalls doppelbrechend, aber mit verwickelterem Verhalten; sie sind „optisch zweiachsig".

Wir werden zuallermeist und wenn nichts weiter bemerkt ist optisch einachsige Kristalle betrachten. Nur nebenher geben wir die Besonderheiten der zweiachsigen Kristalle an, die übrigens grundsätzlich Neues nicht bieten.

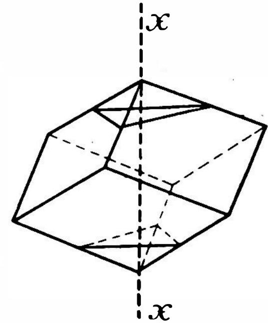


Abb. 55. Kalkspat-Rhomboeder ⊥ zur Achse geschnitten.

179. Die Doppelbrechung wurde zuerst am Kalkspat gefunden, der deshalb auch den Namen „Doppelspat" erhielt. Wir werden diesen hexagonalen und somit optisch einachsigen, rhomboedrischen Kristall oft als ein Beispiel benutzen, an welchem das Wesentliche auch für andere Kristalle klar zu machen ist.

Betrachtet man irgend einen Gegenstand, z. B. einen Strich auf Papier, durch eines der klaren Stücke dieses Minerals, wie es besonders auf Island gefunden wurde, so sieht man den Gegenstand verdoppelt, weil aus jedem vom Gegenstand kommenden Strahl im Spat zwei Strahlen von verschiedener Richtung werden, die dann ins Auge gelangen. Hat man ein Prisma aus Kalkspat, so erhält man mit ihm aus einem Strahl weißen Lichtes zwei Spektren, beide nach der stumpfen Seite des Prismas hin gelegen, doch verschieden weit abgelenkt, beide von Rot bis Violett gehend und Violett bei beiden mehr gebrochen als Rot. Es ist also alles wie bei einem Glasprisma (44, 46), jedoch

verdoppelt. Die Spektren können bei gehörigen Abständen des auffangenden Schirms weit voneinander getrennt sein.

Untersuchung des Strahlenganges mittels eines Papierstücks zeigt, daß die Verdoppelung des ursprünglichen Strahles schon beim ersten Eintritt in den Spat stattfindet, wie es Abb. 54a und b darstellen. Beim Austritt in die Luft erfolgt keine weitere Verdoppelung, sondern es divergieren die beiden Strahlenbündel, die die zwei Spektren ergeben, dann nach einfacher Brechung vom Lot nur weiter bis zum Schirm.

180. Ordentlicher und außerordentlicher Strahl. — Führt man Lichtbrechungsversuche mit Benutzung verschieden gerichteter Eintrittsflächen an einem Kalkspatkristall aus, die man auch künstlich anschleifen kann, und variiert man auch den Einfallswinkel des Strahls, so findet man teilweise sehr sonderbare Fälle der Doppelbrechung. Es kann z. B. (Abb. 54b) bei senkrechtem Einfall zwar der eine der beiden Strahlen gradlinig durchgehen, wie es gewöhnlicher Brechung entspricht, der andere Strahl aber kann beim Eintritt vom Lot abgebrochen werden und erst beim Wiederaustritt diesem parallel weitergehen. Ja es kann sogar ein Heraustreten eines der beiden Strahlen aus der Einfallsebene stattfinden.

Diese Fälle zeigen, daß das Brechungsgesetz (34) für diesen einen der beiden Strahlen, der so eigentümliches Verhalten zeigt, nicht gilt; man nennt ihn daher den außerordentlichen (extraordinären) Strahl. Er ist in den Abbildungen mit e bezeichnet. Der andere Strahl, mit o bezeichnet, folgt stets dem Brechungsgesetz mit festem Brechungsexponenten; er wird ordentlich (ordinär) genannt.

181. Optische Achse. — Eine besondere Richtung findet sich im Kristall, in welcher die Doppelbrechung fehlt, ordentlicher und außerordentlicher Strahl also zusammenfallen; man nennt diese Richtung die optische Achse des Kristalls. Sie fällt bei den einachsigen Kristallen mit der kristallographischen Hauptachse zusammen. Beim Quarz ist sie demnach parallel der Kantenrichtung der sechseckigen Säulen; beim Kalkspat ist sie symmetrisch durch die stumpfe Rhomboederecke gerichtet (x x, Abb. 55)[1]). Schleift man einen Kalkspatkristall an seinen beiden gegenüberliegenden stumpfen Rhomboederecken symmetrisch mit Ebenen an, wie es die Dreiecksflächen in Abb. 55 zeigen, so stehen diese senkrecht zur kristallographischen und optischen Achse x x; der Kristall ist dann „senkrecht zur Achse geschliffen" (oder „geschnitten"). Ein in Richtung von x x auftreffender Lichtstrahl durchsetzt dann die Platte gradlinig, ungebrochen, als wäre sie etwa Glas, weil der Strahl so in Richtung der optischen Achse im Kristall zu laufen kommt, in welcher Richtung es keine Doppelbrechung gibt.

182. Die weiteste Trennung des außerordentlichen vom ordentlichen Strahl, die stärkste Doppelbrechung, findet man in Richtungen senkrecht zur optischen Achse. Ein Prisma aus Kalkspat oder Quarz, dessen Kante parallel der optischen Achse liegt, gibt somit die weiteste Trennung der schon beschriebenen beiden Spektren. Man hat hier ein Maß für die Doppelbrechung des betreffenden Stoffes, und man kann dasselbe quantitativ gestalten, indem man für jeden der beiden Strahlen — monochromatischen Lichtes — den zugehörigen Bre-

[1]) Die optische Achse ist, wie die kristallographischen Achsen, stets nur als eine im Kristall feste Richtung aufzufassen, nicht als eine bestimmte Linie.

chungsexponenten bestimmt (44), den ordentlichen und den außerordentlichen. Freilich ist dann nur der ordentliche Brechungsexponent zur Vorausberechnung beliebiger Strahlengänge nach dem Brechungsgesetz verwertbar (180); die Differenz beider Brechungsexponenten gibt aber das Maß für die Doppelbrechung. Es ist beispielsweise die Doppelbrechung beim Kalkspat sehr viel stärker als beim Quarz.

Es ist aber hierbei noch ein anderer Unterschied vorhanden. Beim Kalkspat ist nämlich stets der ordentliche Strahl stärker gebrochen (näher dem Einfallslot), wie es z. B. in Abb. 54a zu sehen ist; beim Quarz wird umgekehrt der außerordentliche Strahl stärker gebrochen. Man nennt die Kristalle der ersten Art einachsig negativ, die der zweiten einachsig positiv (s. 189).

183. Polarisation bei der Doppelbrechung. — Wesentlich verbunden mit Doppelbrechung ist immer die Polarisation der beiden gebrochenen Strahlen. Sie sind beide vollständig polarisiert (167) und zwar „senkrecht zu einander", d. h. mit senkrecht zueinander gerichteten Schwingungsebenen (169). Abb. 54a zeigt dies für Kalkspat in der schon in Abb. 54 (172) benutzten Zeichnungsweise; man sieht, daß natürliches Licht einfällt und daß der ordentliche Strahl senkrecht zur Einfallsebene (Zeichnungsebene), der außerordentliche aber in dieser Ebene (elektrisch) schwingt.

184. Hauptschnitt. — Um diese Schwingungsrichtungen bei Doppelbrechung in jedem vorliegenden Falle sogleich angeben zu können, lege man eine Ebene durch den gegebenen Strahl und die optische Achse des Kristalls. Diese Ebene wird der „Hauptschnitt" genannt[1]). Es schwingt dann der ordentliche Strahl senkrecht zum Hauptschnitt und der außerordentliche im Hauptschnitt. Im Beispielsfalle der Abb. 54a muß nach den dort verzeichneten Schwingungsrichtungen die Zeichnungsebene selbst der Hauptschnitt für beide Strahlen sein; es liegt also hier die optische Achse des Kristalls in der Zeichnungsebene. Bei schief zur Zeichnungsebene liegender Achse wären die Schwingungsrichtungen ebenfalls schief, wenn auch stets senkrecht zu einander.

185. Spate als Polarisatoren und Analysatoren. — Die Vollständigkeit der Polarisation bei der Doppelbrechung macht dieselbe zu einem der bequemsten Mittel, polarisiertes Licht zu erhalten.

Da man gewöhnlich nur einen einzigen polarisierten Strahl wünscht, kommt es darauf an, den zweiten zu beseitigen. Dies kann durch Wegreflektieren desselben geschehen. So beim „Nicolschen Prisma" und bei ähnlich zubereiteten Spaten, in welche künstlich eine Schicht optisch dünneren Stoffes (Kanadabalsam oder auch Luft) eingefügt ist von solcher Neigung zu den beiden gebrochenen Strahlen, daß der eine derselben (der stärker gebrochene, ordentliche) zur Seite abreflektiert wird, wo er auf Schwärzung trifft und somit der Absorption verfällt, während der andere Strahl für sich allein durchgeht. Man kann die Schwingungsrichtung des durchgehenden Strahles an der Fassung eines solchen Spates fest bezeichnen (sie liegt in der kurzen Diagonale seiner rhombischen Endflächen). Fällt dann beliebiges Licht durch den Spat, so ist man immer sicher, nur diese eine Schwingungsrichtung durchgehend zu haben. Dies ist die Anwendung des Spats als Polarisator. Ebenso gut ist er auch als Analysator zu brauchen; man hält ihn einfach vors Auge und sieht dann alle Schwingungskomponenten senkrecht zu seiner Durchlaßrichtung verdunkelt. Will man eine vorhandene Polari-

[1]) Über den Hauptschnitt bei zweiachsigen Kristallen s. 193.

sationsrichtung aufsuchen, so dreht man den Spat um den durchgehenden Strahl als Achse; bei größter Verdunkelung steht dann seine Durchlaßrichtung senkrecht auf der gesuchten Polarisationsrichtung.

Blickt man durch zwei solche Spate, hintereinander ans Auge gehalten, nach einem hellen Gegenstand, so sieht man volle Helligkeit bei parallel gestellten Durchlaßrichtungen, vollkommene Dunkelheit bei zueinander senkrechten Durchlaßrichtungen. Oder kurz: „Parallele Spate geben Helligkeit; gekreuzte Spate Dunkelheit". Letzteres ist ein höchst erstaunlicher Fall: zwei einzeln vollkommen durchsichtige Kristalle zusammen undurchsichtig! Doch die bekannten, für die Natur des Lichtes so aufschlußreichen Einzelheiten erklären den Fall, wie übrigens auch den ebenso erstaunlichen Fall der beiden einzeln, nicht aber zusammen reflektierenden, gekreuzten Spiegel (173).

186. Turmalinzange. — Eine andere gute Möglichkeit zur Beseitigung eines der beiden bei Doppelbrechung entstehenden Strahlen bietet selbsttätig der schwach farbige Turmalin, ein hexagonaler Kristall; er absorbiert in nicht allzu dünner Schicht den einen Strahl und läßt nur den anderen durch. Man schleift ihn für beste Wirkung parallel zur Achse. Zwei solche Turmaline, gefaßt zum Halten vors Auge und einzeln um die Strahlrichtung drehbar, geben die „Turmalinzange", so genannt wegen der Möglichkeit, Gegenstände, die im polarisierten Licht untersucht werden sollen, zwischen die beiden Turmaline zu klemmen. Es ist dies eine Vereinigung von Polarisator und Analysator in kleinstem Raum, günstig für manche Zwecke. Etwas störend beim Gebrauch mit weißem Licht ist nur die (grünliche bis bräunliche) Färbung der Turmaline.

Neuerdings hat man auch Schichten künstlicher Kristalle hergestellt, die wie der Turmalin als einfachste Polarisatoren wirken und leicht größere Fläche haben können.

187. Erklärung der Doppelbrechung. — Huygens hat, wie für Reflexion und Brechung von Wellen (40, 41), so auch für die Doppelbrechung eine Erklärung gegeben, die in bestem Zusammenhang mit aller übrigen Kenntnis steht; es war ihm auch die Polarisation der beiden Strahlen — als merkwürdige Einseitigkeit in deren Verhalten — bekannt. Fresnel hat dann, davon ausgehend, die Grundlagen zum Verständnis von allem geliefert, was weiter bis zum Schluß der Optik noch vorzubringen ist. Manches zeigt sich heute, da man Äther und Materie besser kennt als zu Fresnels Zeit, einfacher als in seiner Betrachtungsweise.

So wie die einfache Brechung auf abgeänderter Lichtgeschwindigkeit im brechenden Mittel beruht (42), so muß aus der Doppelbrechung auf zwei verschiedene abgeänderte Geschwindigkeiten im Kristall geschlossen werden, und zwar müssen diese zweierlei Geschwindigkeiten den zwei Schwingungsrichtungen zugehören, welche in den beiden gebrochenen Strahlen vorhanden sind.

Das verschiedene Verhalten verschiedener Schwingungsrichtungen im Kristall ist aber aus dessen molekularem Bau auch verständlich. Man betrachte ein einfachstes Molekül, wie etwa NaCl. Die beiden Atome — bzw. deren elektrische Bestandteile — schwingen jedenfalls in anderer Weise in ihrer Verbindungslinie (so daß ihr gegenseitiger Abstand periodisch sich ändert), als senkrecht zu dieser Linie; es kann jede dieser beiden Schwingungsrichtungen als eine Vorzugsrichtung im betreffenden Körper bezeichnet werden. Schwingen die Elektrizitäten in der einen Vorzugsrichtung mit anderen Massen oder Kräften als in der anderen, so ergibt ihr Mitschwingen mit einer vorbeiziehenden elektrischen Welle verschieden große Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Welle (88) je nach deren Schwingungsrichtung. Damit trennen sich aber auch Wellen — und also auch Strahlen — verschiedener Schwingungsrichtungen voneinander. Die Tatsachen der Doppelbrechung (183, 184) zeigen, daß überhaupt nur zwei aufeinander senkrecht stehende Schwingungsrichtungen sich fortpflanzen, die durch solche im Kristall festliegende Vorzugsrichtungen bedingt sind. Eine von außen her kommende Welle beliebiger Schwingungs-

richtung zerfällt demnach in zwei Wellen, entsprechend den zwei aufeinander senkrecht stehenden Komponenten ihrer Schwingungsrichtung, und die so gesonderten zwei Wellen geben wegen ihrer verschiedenen Geschwindigkeit auch gesonderte, verschieden stark gebrochene Strahlen.

Diese einfachen Gedanken zeigen den Weg zur Erklärung der Erscheinungen der Kristalloptik, ebenso wie aber auch den Weg zu Schlüssen aus den Erscheinungen auf den Kristallbau im einzelnen (vgl. 188—190).

188. Körper ohne Doppelbrechung und einachsige Kristalle. — Für die Doppelbrechung kommt es danach darauf an, daß überall einheitliche Vorzugsrichtungen der Mitschwingungsmöglichkeit der Molekülteile im Medium vorhanden seien. Dies ist nicht der Fall, wenn die Moleküle ungeordnet sind, so daß die Vorzugsrichtungen, die sie einzeln haben, allseitig verstreut sind, aber auch dann nicht, wenn die Vorzugsrichtungen gleichmäßig nach den drei Raumrichtungen verteilt sind, wie beispielsweise bei den Würfeln des Steinsalzes, wo die Einzelgruppen NaCl. längs jeder der Würfelkanten vorkommen (vgl. Abb. 58 der Mechanik, Bd. I) Dies ist als der Grund anzusehen, warum die regulären Kristalle ebensowenig doppelbrechend sind als die unkristallisierten Körper.

Bei den einachsigen Kristallen (178) ist eine durchgehende Vorzugsrichtung vorhanden: die kristallographische Hauptachse, die zugleich optische Achse ist (181). Es ist anzunehmen, wie es der vollständigen Achsensymmetrie der Kristallformen der einachsigen Systeme entspricht, daß jede Richtung senkrecht zu dieser Vorzugsrichtung, d. i. zur Achse, gleichartig mitschwingend ist. Es wird dann für jeden, beliebig gerichteten Strahl die Schwingung senkrecht zum Hauptschnitt (184) gleichartiges Mitschwingen der Molekülteile, somit gleiche Fortpflanzungsgeschwindigkeit haben; denn diese Schwingung steht stets senkrecht zur Achse (da dieselbe im Hauptschnitt ist), wie auch der Strahl gerichtet sei. Es werden sich also alle senkrecht zum Hauptschnitt gerichteten Schwingungen allseitig mit gleicher Geschwindigkeit, d. i. in Kugelwellen ausbreiten. Dies bedingt das ordentliche Verhalten von Strahlen dieser Schwingungsrichtung. Die Schwingungen im Hauptschnitt haben je nach der Strahlrichtung verschieden große Komponenten in Richtung der Achse; es wird also je nach der Strahlrichtung ungleiches Mitschwingen in Achsenrichtung und damit ungleiche Beeinflussung der Fortpflanzungsgeschwindigkeit zu erwarten sein. Die größte Beeinflussung muß für Strahlrichtungen senkrecht zur Achse stattfinden, weil für diese die Schwingung ganz in der Achse liegt; diese Strahlen eilen also den senkrecht zum Hauptschnitt schwingenden voraus oder bleiben zurück, je nach der Beschaffenheit der Kristallmoleküle. Ganz fehlen muß die Beeinflussung der Fortpflanzungsgeschwindigkeit durch das besondere Mitschwingen in Achsenrichtung bei Strahlen, die selbst diese Richtung haben; denn deren Schwingungen können gar keine Komponente in Achsenrichtung haben; sie werden also die gleiche Fortpflanzungsgeschwindigkeit haben müssen wie senkrecht zum Hauptschnitt schwingende Strahlen. Dies bedeutet das Fehlen einer Zweiteilung der Fortpflanzungsgeschwindigkeit, d. i. das Fehlen der Doppelbrechung in der Achsenrichtung. In zwischenliegenden Richtungen sind zwischenliegende Fortpflanzungsgeschwindigkeiten der im Hauptschnitt schwingenden Strahlen zu erwarten. Die Ungleichheit der Ausbreitungsgeschwindigkeit dieser Strahlen, je nach ihrer Richtung, bedingt das Außerordentliche ihres Verhaltens (180).

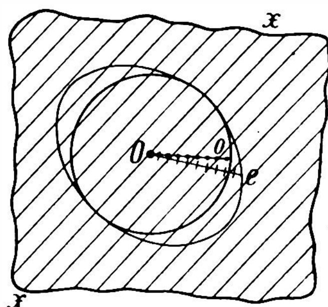


Abb. 56. Lichtausbreitung im Kalkspat.

189. Wellenfläche der einachsigen Kristalle. — Zusammengefaßt sind diese Ergebnisse in Abb. 56 dargestellt. Es sei bei O eine kleine Höhlung im Inneren von Kalkspat und in dieser eine allseitig strahlende punktförmige Lichtquelle. In einem nicht kristallisierten Stoffe würde sie Kugelwellen erzeugen. Im Kalkspat teilen sich alle Schwingungsrichtungen der ausgesandten Strahlen in zwei Komponenten (187), die eine senkrecht zum Hauptschnitt, die andere in demselben schwingend. Wir nehmen die Achsenrichtung x x des Spats in der Zeichnungsebene gelegen an; diese Ebene ist dann Hauptschnitt für alle Strahlen die in ihr liegen. Zwei dieser

Strahlen sind mit ihren Schwingungsrichtungen gezeichnet. Der eine, o, senkrecht zum Hauptschnitt schwingend, gehört nach dem Vorausgegangenen einer Kugelwelle an; er ist ein ordentlicher Strahl. Der andere, e, im Hauptschnitt schwingend, ein außerordentlicher Strahl, eilt voraus. Dieses Vorauseilen ist am stärksten in allen Richtungen senkrecht zur Achse; es fehlt in der Achsenrichtung selbst. Im ganzen wird das Vorauseilen durch ein kurzachsiges Rotationsellipsoid dargestellt, das die Kugel der ordentlichen Strahlen umgibt, wie es die Abbildung zeigt; dieses Ellipsoid ist die Wellenfläche des außerordentlichen Strahles. Solche Doppelwellenflächen werden sich also vom Punkt O ausbreiten — Kugel umschlossen vom Ellipsoid —, und jede der beiden Flächen enthält nur die eine der beiden Schwingungskomponenten, in welche jede andere Schwingungsrichtung im Kristall zerfällt.

Abb. 57 stellt die (Doppel-) Wellenfläche des Kalkspats durch ihre Schnitte mit drei aufeinander senkrechten Ebenen in einem Modelle dar. Die Kugelwelle



Abb. 57. Wellenfläche einachsiger Kristalle (Kalkspalt).



Abb. 58. Wellenfläche zweiachsiger Kristalle.

der ordentlichen Strahlen ist weiß ausgefüllt; die überragenden Teile des Ellipsoids der außerordentlichen Strahlen sind schwarz. Wo beide einander berühren ist die optische Achse x x, als dunkle Linie ersichtlich gemacht. Das Verhältnis der großen Ellipsoidachse zum Kugelradius ist das Verhältnis der größten zur kleinsten im Kalkspat vorkommenden Lichtgeschwindigkeit und daher auch das Verhältnis des ordentlichen zum außerordentlichen Brechungsexponenten (182)[1]).

Es kommt auch vor, z. B. beim Quarz, daß die Schwingungen im Hauptschnitt, nämlich die des außerordentlichen Strahles, langsamer sich ausbreiten als die senkrecht zum Hauptschnitt. Dies muß nach dem Vorhergehenden (187) dann eintreten, wenn in der Achsenrichtung mehr Mitschwingen stattfindet als in den darauf senkrechten Richtungen (beim Kalkspat umgekehrt). Man nennt solche Kristalle einachsig positiv (Kalkspat ist einachsig negativ, 182). Ihre Wellenfläche hat dementsprechend das Ellipsoid in der Kugel; es ist langachsig und berührt die Kugel an den Endpunkten der langen Achse, die somit auch optische Achse ist.

190. Wellenfläche der zweiachsigen Kristalle. — Abb. 58 zeigt diese Doppelwellenfläche in der schon bei Abb. 57 erläuterten Darstellungsweise. Man sieht hier auch Kreise und Ellipsen als Schnitte mit den drei Ebenen; jedoch ist keine der beiden Flächen weder Kugel noch auch Ellipsoid, sondern sie sind verwickelterer Art. Die innere (weiß ausgefüllte) Wellenfläche hat vier Spitzen, an welchen sie die äußere, welche eben dort vier Grübchen (Nabelpunkte) hat, berührt. In den Richtungen x_1x_1 und x_2x_2 nach diesen Berührungspunkten haben beide Strahlen gleiche Geschwindigkeit, also auch gleiche Brechung; in diesen beiden Richtungen ist also der Kristall einfachbrechend; dies sind seine zwei optischen Achsen. Jede der beiden Winkel-

[1]) In der Abb. ist der Unterschied der Brechungsexponenten der besseren Deutlichkeit halber übertrieben.

halbierenden der Achsen heißt Mittellinie; die eine steht in der Abbildung senkrecht, die zweite waagrecht. Der (kleinere) Winkel zwischen beiden Achsen heißt Achsenwinkel. Dieser zusammen mit den drei Brechungsexponenten, deren Verhältnis gleich ist dem Verhältnis der kleinsten (in der Abbildung vertikalen weißen), der mittleren (vertikal schwarzen) und der größten (horizontal schwarzen) Abmessung der Wellenfläche, bestimmt den optischen Charakter des zweiachsigen Kristalls. Zu bemerken ist, daß hier beide Strahlen außerordentlich sind, d. h. keinem Brechungsgesetz folgen, weil keiner eine Kugelwelle hat. Der komplizierten Wellenform entspricht auch das ebensolche optische Verhalten der zweiachsigen Kristalle. Wir gehen auf dasselbe nur nebenher ein, da es bloß Folge des komplizierten Molekülbaues der betreffenden Stoffe ist, ohne daß dabei grundsätzlich Neues auftritt.

Die aus dem optischen Verhalten gezogenen Schlüsse über Einzelheiten des Molekülbaues der verschiedenen Kristalle sind durch die Kristalluntersuchungen mittels der Hochfrequenzstrahlen (160) bestätigt.

191. Einzelfälle der Doppelbrechung. — Es ist nun, nach Kenntnis der Wellenflächen, die Doppelbrechung unmittelbar auch im einzelnen verfolgbar, wie das Huygens schon (1677) für den Kalkspat gezeigt hat. Alle die bereits erwähnten, über das Brechungsgesetz hinausgehenden, höchst verwickelt erscheinenden Sonderbarkeiten des extraordinären Strahlenlaufes (180) finden ihre einfache Erklärung, bzw. zutreffende Voraussage, wenn man Huygens' Prinzip mit der richtigen Wellenfläche zur Anwendung bringt, wie es für den Fall der einfachen Brechung in Abb. 19 (41) geschehen ist. Es sei F F (Abb. 59) die Oberfläche eines Kalkspatkristalls (gegen Vakuum), dessen Achsenrichtung (in der Zeichnungsebene liegend) durch den Doppelpfeil angezeigt ist. 0A sei eine einfallende Wellenfront mit der Strahlrichtung A4. Wieder sind von 0 bis 4 hin die Elementarwellen zu zeichnen, deren jede hier eine Doppelwelle ist. Es genügt, die eine Doppelwelle um 0 mit richtiger Orientierung und im richtigen Größenverhältnis zu zeichnen, so daß 0x parallel der Kristallachse ist und der Kugelradius $0B_o$ zu A4 sich verhält wie 1 zum ordentlichen Brechungsexponenten des Kalkspats, um sogleich die neuen Wellenfronten als Tangentialebenen zu ziehen: $4B_o$ an die Kugel und $4B_e$ an das Ellipsoid. $0B_o$ ist dann der ordinäre Strahl und $0B_e$ der schwächer gebrochene extraordinäre Strahl. In der Abbildung ist danach auch das Fortschreiten des zweifachen Strahlenbündels gezeichnet bis zu nochmaligem Ablauf der Zeit des Vakuum-Lichtweges A4, woraus man sehr gut das Voraneilen des einen Strahlenbündels vor dem anderen sieht.

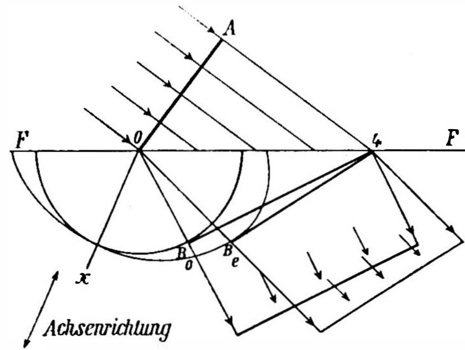


Abb. 59. Doppelbrechung.

Man sieht hier den für extraordinäre Strahlen allgemein charakteristischen Fall, daß der Strahl schief zur Wellenfront steht (wie der Leitstrahl zur Tangentialebene eines Ellipsoids).

Man bemerkt ferner, daß der außerordentliche Strahl auch aus der Einfallsebene heraustreten kann, wenn nämlich die Kristallachse nicht in dieser Ebene liegt (ohne aber senkrecht zu ihr zu stehen), womit der Berührungspunkt B_e außerhalb diese Ebene fällt.

Der in Abbildung 54b dargestellte merkwürdige Brechungsfall des außerordentlichen Strahles bei senkrechtem Einfall entspricht unmittelbar der Achsenlage von Abb. 59; denn bei senkrechtem Einfall werden beide Tangentialebenen horizontal, wobei aber nur der Berührungspunkt der Kugel in die einfallende Strahlrichtung fällt, während der des Ellipsoids seitwärts liegt.

Erscheinungen an Kristallplatten im polarisierten Licht.

192. Gangunterschiede durch Doppelbrechung. — Ordentlicher und außerordentlicher Strahl laufen im Kristall mit verschiedener Geschwindigkeit (187); sie haben daher bei gleicher Schwingungsdauer verschiedene Wellenlängen (A Gl. 5). Es kann so kommen, daß eine Kristallplatte in ihrer Dicke beispielsweise ½ Wellenlänge mehr vom einen Strahle faßt als vom andern. Wenn die beiden Strahlen aus einem einzigen Strahl entstanden sind, wie es durch Doppelbrechung beim Eintritt in die Platte geschieht, so haben sie am Anfange ihres Weges durch die Platte gleiche Phase; nach Durchsetzung der Platte treten sie aber mit einem Gangunterschied (122) von ½ Wellenlänge, d. i. mit entgegengesetzten Phasen aus, und dies gibt die Möglichkeit von Interferenzen.

Gegenseitige Auslöschung der beiden Strahlen kann jedoch hier unmittelbar nicht stattfinden; denn die Kräfte ihrer Schwingungen stehen senkrecht aufeinander (183), was nie die Resultierende Null gibt. Wohl aber kann Auslöschung stattfinden, wenn man das von der Platte kommende Licht durch einen Analysator gehen läßt[1]). Die folgende Überlegung zeigt dies im einzelnen.

193. Kristallplatte zwischen parallelen Spaten[2]). — Es sei eine Kristallplatte parallel der optischen Achse geschnitten, oder, falls sie zweiachsig ist[3]), parallel einer Mittellinie oder auch beiden Mittellinien. Sie gibt dann gute Doppelbrechung senkrecht sie durchsetzender Strahlen ohne seitliche Ablenkungen. Die Ebene dieser Platte sei zugleich Zeichnungsebene der Abb. 60a, b, c; a und b stellen Vorgänge an der Eintrittsfläche des Strahls in die Platte dar, c bezieht sich auf die Austrittsfläche bei einer $\lambda/2$-Platte. Der zu betrachtende einfarbige Strahl trete bei O_1 (von hinter der Zeichnungsebene kommend) in die Platte ein; er schwinge in der Richtung P P, und a sei seine augenblickliche Amplitude beim Eintritt, wofür besonders Abb. 60b gelte. Diese Amplitude zerfällt sofort im Kristall, seiner Doppelbrechung entsprechend, in die beiden Amplituden e und o, die eine im Hauptschnitt H H[4]), die andere senk-

---

[1]) Die Energiewegweisung findet bei allen hier und im folgenden zu betrachtenden Interferenzen im Analysator statt. Dort wird das Licht weggesondert, dessen Fehlen die zu beobachtenden Verdunkelungen oder Farbenerscheinungen ergibt.

[2]) Wir gebrauchen öfter den kurzen Ausdruck „Spat" für Polarisator und Analysator. Die Spate können etwa Nicolsche Prismen sein (vgl. 185).

[3]) Geeignet sind Gipskristalle und Glimmer, weil sie leicht durch Spaltung brauchbare Platten liefern. Beides sind zweiachsige Kristalle. Beim Gips liegen beide Achsen und also auch beide Mittellinien in der Spaltungsebene. Beim Glimmer steht eine Mittellinie sehr nahe senkrecht zur Spaltungsebene, die andere liegt darin. Die Schwingungsrichtungen eines senkrecht durchgehenden Strahles sind dann parallel und senkrecht zu der in der Platte liegenden Mittellinie. Letztere ersetzt in diesem Falle zweiachsiger Kristalle die optische Achse der einachsigen Kristalle zur Bestimmung des Hauptschnitts.

[4]) Bei einem einachsigen Kristall wäre H H die Achsenrichtung, bei einem zweiachsigen eine der Mittellinien (vgl. vorige Fußnote).

Eintrittsfläche des Lichtstrahles. Austrittsfläche (λ/2-Platte).

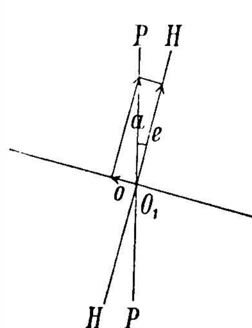


Abb. 60 a.

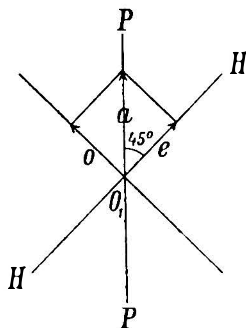


Abb. 60 b.

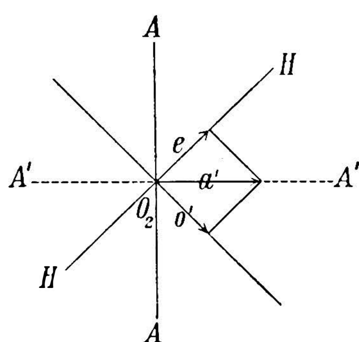


Abb. 60 c.

Schwingungsrichtungen polarisierten Lichtes in einer parallel zur Achse (bzw. zur Mittellinie) geschliffenen Kristallplatte,
a bei ungünstiger Lage des Hauptschnittes,
b und c bei günstiger Lage des Hauptschnittes (45° zur Polarisationsebene).

recht dazu gelegen (183, 184). In der Platte schließen sich daran die zwei Wellenzüge mit den schon hervorgehobenen etwas verschiedenen Wellenlängen. Es liege in der Dicke der Platte eine genau ganze Anzahl der Wellen des einen Strahls, e, aber eine halbe Welle mehr (oder weniger) vom anderen Strahle o, in welchem Falle die Platte eine „λ/2-Platte" genannt wird. Es ist dann an der Austrittsfläche, für welche Abb. 60c gilt, dieselbe Amplitude e des einen Strahls, wie an der Eintrittsfläche vorhanden, wogegen die Amplitude des anderen Strahles die o entgegengesetzte Richtung o' hat. Diese beiden Amplituden setzen sich beim Austritt in die Luft am Punkte O_2 sogleich zu der einen, a', zusammen, an welche der weitere Wellenzug mit der Schwingungsebene A'A' sich schließt, der ins beobachtende Auge gelangen kann. Dasselbe sieht dann Helligkeit, als wäre die Kristallplatte nicht vorhanden. Ist aber zwischen Auge und Platte ein Analysator mit der Durchlaßrichtung AA, welche parallel der ursprünglichen, auf die Platte fallenden Schwingungsrichtung PP (Abb. 60b) ist, was somit ohne die Platte Helligkeit ergäbe, so wird mit der Platte Verdunkelung eintreten müssen. Denn die aus der Platte tretende Schwingungsrichtung A'A' wird von dem Analysator nicht durchgelassen. Dies ist die Auslöschung des Lichtes durch eine λ/2-Platte. Eine 3λ/2-, 5λ/2- usw. Platte würde ebenso Auslöschung ergeben. Eine λ-, 2λ-, ... Platte würde nicht auslöschen.

194. Man sieht aus dieser Überlegung, daß zur charakteristischen Verdunkelungswirkung der Kristallplatte ebenso wie der Analysator auch der Polarisator notwendig ist. Fiele unpolarisiertes Licht auf die Platte, so würden außer der Schwingungsrichtung a' (Abb. 60c) auch Schwingungsrichtungen austreten, die den Analysator AA durchsetzen, was die Verdunkelung verhinderte, so wie auch mit dem Polarisator allein keine Verdunkelung eintritt.

Außerdem ist die vorausgesetzte 45°-Lage der Platte, nämlich der Winkel von 45° zwischen Hauptschnitt HH und Schwingungsrichtung PP des Polarisators (Abb. 60b) für vollständige Verdunkelung notwendig. Denn bei anderen Winkeln fallen die beiden Komponenten e und o ungleich aus (vgl. Abb. 60a),

und es würde deren neue Resultierende nicht senkrecht zu P P stehen, was wieder die Verwandlung von Helligkeit in vollständige Dunkelheit verhinderte. Beim Winkel von 0° oder 90° hat, wie ebenfalls leicht einzusehen, die Kristallplatte überhaupt keine Wirkung.

Die volle Verdunkelungswirkung im hier betrachteten Falle paralleler Spate und einfarbigen Lichtes bei 45°-Lage der Platte ist auch maßgebend für volle Entwickelung der bei weißem Licht erscheinenden Farben (196).

195. Daß zwischen gekreuzten Spaten dieselben $\lambda/2$- (oder $3\lambda/2$-, $5\lambda/2$- ...) Platten in 45°-Lage Helligkeit aus der Dunkelheit entstehen lassen, ist aus den gleichen Überlegungen (193) unmittelbar verständlich, weil die gekreuzte Analysatorrichtung A′A′ (Abb. 60c) die Schwingung a′ durchläßt. λ- (2λ-, 3λ-, ...) Platten haben auch hier keine Wirkung.

196. Gipskeil; Erscheinungen im weißen Licht. — Ein Keil aus Gipskristall, geschliffen in der schon angegebenen Orientierung (193), zeigt, wie nun ohne weiteres einzusehen ist, zwischen gekreuzten Spaten (195) alle Erscheinungen des früher (128, Abb. 45) betrachteten Luftkeiles im reflektierten Licht.

In einfarbigem Licht erscheinen die abwechselnd hellen und dunklen Stellen, immer je nach dem Gangunterschied. Die Kante des Keiles — Dicke Null — muß dabei dunkel bleiben, wie ohne Gips zwischen den gekreuzten Spaten; die Dicke mit dem Gangunterschied $\lambda/2$ gibt Helligkeit, λ Dunkelheit, $3\lambda/2$ wieder Helligkeit usw.

In weißem Licht erscheinen die Farben von Newtons Ringen, verteilt nach ihren Ordnungen (Tab. 39), indem dieselben Farbengemische sich bilden müssen, wie aus gleichwirkendem Anlaß beim Luftkeil im reflektierten Licht. Man erhält hier mit gar nicht sehr dünnem Gipskeil die Farben sogar leicht viel breiter auseinandergezogen als mit Newtons Farbenglas, weil die für eine bestimmte Farbe (für einen bestimmten Gangunterschied) erforderliche Dicke beim Gips rund 200mal so groß ist als bei der Luftschicht. Man kann daher auch leicht Gipsplatten durch Spaltung herstellen, die irgendeine der Farben in vollkommener Einheitlichkeit auf großer Fläche zeigen. Beispielsweise erhält man die prachtvollen Farben 3. Ordnung bei den leicht zu handhabenden Plattendicken 0·15 bis 0·22 mm. Glimmer hat senkrecht zur Spaltungsfläche besonders geringe Doppelbrechung und gibt daher die gleichen Farben bei noch dickeren Schichten.

Zwischen parallelen Spaten (193) ist die Kante des Keiles weiß, und alle Färbungen sind komplementär zu den vorigen, wie leicht einzusehen, da jetzt gerade das Licht ins Auge gelangt, das vorher durch den gekreuzten Analysator aus dem vollen Weiß beseitigt war. Es sind das die Farben dünner Blättchen im durchgehenden Licht (130), nur mit dem Unterschied, daß sie hier in voller Sättigung auftreten, ohne das überschüssige Weiß, das dort wegen der Ungleichheit der Amplituden als Rest von der Interferenz übrigblieb.

Zu dicke Kristallschichten können keine Farben zeigen, was denselben Grund hat wie bei den zu dicken Luftplatten (128).

197. Zirkular und elliptisch polarisiertes Licht. — Es ist von Interesse zu betrachten, was zwischen Kristallplatte und Analysator vor sich geht, wenn die Platte Gangunterschiede gibt, die weder runde ganze noch halbe Wellenlängen sind, wenn z. B. eine

$\lambda/4$- oder $\lambda/8$-Platte verwendet wird. Daß die Platte dann weder volle Helligkeit noch vollständige Dunkelheit für die betreffende Wellenlänge geben kann, sondern etwas Zwischenliegendes, ist aus dem Vorhergegangenen klar. Die nähere Betrachtung zeigt, daß die Platte dabei überhaupt nicht linear schwingendes Licht in den Analysator liefert, sondern im allgemeinen elliptisch schwingendes. Es kommen nämlich in diesem Falle niemals gleichzeitig volle Amplituden an der Austrittsfläche der Strahlen zusammen; es sind immer ungleiche Elongationen der beiden Strahlen in stets wechselndem Größenverhältnis gleichzeitig da (im Gegensatz zum Falle der Abb. 60 c, wo e und o′ einander gleich sind und wo auch zu allen Zwischenzeiten nur gleiche Elongationen zusammenkommen). Es wird dann die neue Resultierende keine bestimmte, sondern stets wechselnde Richtung haben, d. h. es wird keine lineare, sondern eine in der ganzen quer zum Strahl stehenden Ebene verlaufende Schwingung zustande kommen.

Es gelten hier die schon in der Akustik betrachteten Zusammensetzungen zweier aufeinander senkrechter Schwingungen gleicher Schwingungsdauer aber verschiedener Phase (A 81); denn die elektrischen Kräfte, welche hier beim Lichte Amplitude und Elongationen sind, setzen sich — wie alle anderen Kräfte oder sonstige einander nicht störende Vektorgrößen — ganz in derselben Weise zusammen, wie die dort betrachteten materiellen Verschiebungen. Wir fanden dort beim vorliegenden Falle gleicher Schwingungsdauern im allgemeinen elliptische Schwingungen, und dies gilt auch für die Phasendifferenz von $1/8$ Schwingungsdauer, wie sie eine $\lambda/8$-Platte erzeugt. Bei $1/4$ Schwingungsdauer Phasendifferenz erfolgt Kreisschwingung, bei $1/2$ die schon für sich betrachtete diagonale geradlinige Schwingung (193).

So entsteht also bei Gangunterschieden, die nicht ganze Zahlen von Halbwellenlängen sind, „elliptisch" oder „zirkular polarisiertes" Licht. Da an Stelle der für die materielle Schwingung betrachteten Verschiebungen hier die elektrischen Kräfte treten, ist die Bedeutung beispielsweise der zirkularen Polarisation diese: daß die elektrische Kraft ihre Richtung im Kreise herum dreht, einmal in der Wellenlänge, stets senkrecht zum Strahl bleibend, oder — was dasselbe ist — zeitlich an derselben Stelle einmal während der Schwingungsdauer. Es wechselt also beim zirkular polarisierten Strahl die elektrische Kraft ihre Richtung wie beim linear polarisierten längs $1/2$ Wellenlänge (s. Abb. 1), jedoch nicht indem sie dazwischen Null wird, sondern indem sie sich dazwischen senkrecht zur Zeichenebene stellt. Die magnetische Kraft dreht sich mit, stets senkrecht zur elektrischen (und zum Strahl) bleibend[1]).

Es gibt rechts- und links-zirkular polarisiertes Licht, je nachdem die Drehung im einen oder anderen Sinne vor sich geht. Zwei solche entgegengesetzt zirkular polarisierte Strahlen von gleicher Wellenlänge und Amplitude geben in Übereinanderlagerung linear polarisiertes Licht, wie leicht einzusehen, ebenso wie zwei gegeneinander laufende Kreisbewegungen lineare Bewegung geben, weil dabei in der einen Durchmesserrichtung jederzeit zwei einander entgegengesetzte Bewegungen, in der darauf senkrechten Durchmesserrichtung aber stets übereinstimmende Bewegungen vorhanden sind, so daß nur Bewegung in dieser einen Richtung übrigbleibt.

Das elliptisch polarisierte Licht unterscheidet sich vom zirkularen nur dadurch, daß die elektrische (und magnetische) Kraft außer der Drehung auch noch gleichperiodische Größenänderung macht. Man sieht ein, daß ein Übergang vom elliptisch polarisierten zum gewöhnlichen (linear) polarisierten Lichte stattfindet, wenn die kleine Achse der Ellipse gegen Null geht, wenn also die Größenänderungen der Kräfte bis zu Null herabgehen, wobei die beim elliptischen Licht schon ungleichförmige Drehung verschwindet.

Zirkular polarisiertes Licht ist ebensowenig einseitig, wie das natürliche Licht (170); man kann es daher von diesem mittels Analysators auch nicht unterscheiden. Der Analysator zeigt bei beiden Lichtern gleichbleibende Helligkeit bei aller Drehung. Schiebt man jedoch eine $\lambda/4$-Platte ein, so daß das Licht erst durch diese und dann durch den Analysator geht, so tritt der Unterschied hervor. Ist natürliches Licht da, so hat die $\lambda/4$-Platte keinen Einfluß (194), ist aber zirkulares Licht da, so verwandelt die $\lambda/4$-Platte dasselbe in linear polarisiertes[2]), was der Analysator leicht erkennen läßt.

---

[1]) Man kann auch das Modell des elektrodynamischen Zusammenhanges (Abb. 63, Bd. IV) in der Bewegungsrichtung fortschreitend und zugleich um diese Richtung ständig sich drehend denken, um die richtige Vorstellung von der Beschaffenheit des zirkular polarisierten Strahls zu haben.

[2]) Die Kreisbewegung ist stets gleichwertig zwei senkrecht aufeinanderstehenden, um $\lambda/4$ gegeneinander verschobenen Schwingungen, aus welchen sie, wie wir sahen, auch entsteht. Die $\lambda/4$-Platte fügt noch $\lambda/4$ Verschiebung hinzu, oder nimmt sie weg, je nach der Stellung der Platte, was $\lambda/2$ oder 0 und somit die geradlinige Schwingung gibt.

Das elliptisch polarisierte Licht verhält sich gegen den bloßen Analysator wie teilweise linear polarisiertes Licht (171). Die $\lambda/4$-Platte kann auch hier entscheiden, was im einzelnen auszuführen nicht nötig ist, da Neues dabei nicht auftritt.

Elliptisch polarisiertes Licht entsteht auch bei der totalen Reflexion (36). Das Licht dringt dabei ein wenig ins dünnere Medium ein, was schon Newton bemerkt hat, und kommt etwas verspätet von diesem Umweg wieder zurück. Die Verspätung ist im allgemeinen ungleich für die beiden Schwingungskomponenten, parallel und senkrecht zur Einfallsebene, so daß dieselben nachher zur elliptischen Schwingung sich zusammensetzen. Dies ist als das Verhalten elektrischer Wellen nach denselben Gedanken eingehend durch Rechnung verfolgbar, wie bei der Herleitung von Fresnels Formeln für die Intensitäten (176).

Ebenso tritt elliptische Polarisation auch bei metallischer Reflexion (55, 87) auf. Zur Erzeugung linear polarisierten Lichtes sind daher wohl einfache spiegelnde Glasflächen, nicht aber metallische oder metallbelegte Spiegel verwendbar.

198. Beobachtungsweise mit parallelem polarisierten Licht. — Alle im Vorhergehenden überlegten Erscheinungen (192—197) setzen voraus, daß die beobachtete Kristallplatte in allen Teilen ihrer Fläche gleichen Strahlengang hat, d. h. daß sie von einem Bündel paralleler Lichtstrahlen — kurz von „parallelem Licht" — getroffen ist. Dies ist am einfachsten verwirklicht, wenn die in deutlicher Sehweite betrachtete Platte von einer hinter ihr befindlichen fernen Lichtquelle beleuchtet ist, z. B. einer hellen Wolke. Die Polarisation des Lichtes wird am einfachsten durch eine spiegelnde Glasplatte besorgt (173); als Analysator kann ein Spat (185) ans Auge gehalten werden. Für Viele gleichzeitig können die Erscheinungen durch Entwerfung eines vergrößerten, reellen Bildes der Kristallplatte mittels einer Linse auf einem Schirm gezeigt werden.

199. Kristallplatten in konvergentem polarisiertem Licht. — Sehr mannigfaltige Erscheinungen erhält man, wenn mit konvergentem Licht beobachtet wird. Das Wesentliche hierbei ist, daß nicht die betreffende Kristallplatte besehen oder projiziert wird, sondern durch sie hindurch eine flächenhafte Lichtquelle, wobei immer wieder vor und hinter der Platte die Spate oder andere Polarisationsmittel zu stehen kommen.

In Abb. 61a sind M und N Bündel unter sich paralleler Strahlen, die nach der planparallelen Kristallplatte K hin konvergieren; ihre Schwingungsrichtung sei P P (in der Zeichnungsebene gelegen). Die aus der Platte divergierenden Bündel sammelt dann eine Linse L so, daß jedes einzelne Bündel in einem Punkt m, n vereinigt wird, wobei der Analysator A A dazwischen gestellt ist, den wir hier gekreuzt annehmen (Durchlaßrichtung senkrecht zur Zeichnungsebene, durch Punkte angedeutet).

Ob in den Punkten m, n Helligkeit oder Dunkelheit für eine bestimmte Wellenlänge auftreten wird, dies hängt von den Gangunterschieden ab, welche die einzelnen Strahlen bei der Doppelbrechung in der Platte finden (192). Diese Gangunterschiede werden für die einzelnen Strahlen jedes der Bündel gleich sein, weil sie in gleicher Richtung gleiche Dicken der Platte durchsetzen; daher werden die Wirkungen der Strahlen je eines Bündels in den Punkten m, n einander nur unterstützen. Verschiedene Bündel werden aber Verschiedenes ergeben, da ihre Wege in der Platte verschiedene Längen und Richtungen haben; es wird also auf einem Schirm S S keine gleichförmige Helligkeit oder Färbung, sondern eine für die Beschaffenheit der Platte charakteristische Figur auftreten.

200. Beispielsfall. — Wir betrachten hier eingehend nur einen der vielen

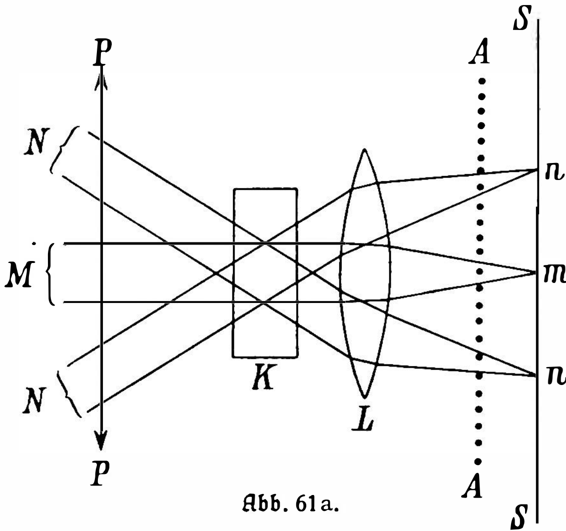


Abb. 61 a.

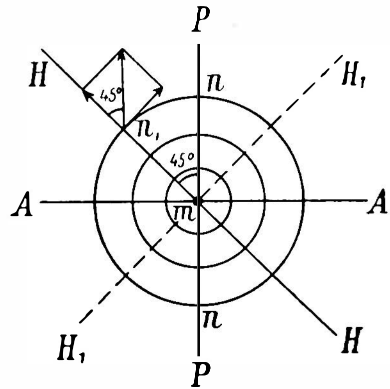


Abb. 61 b.
(Einachsig, ⊥ zur Achse geschliffen.)

Kristallplatte in konvergentem polarisiertem Licht (Strahlengänge schematisch).

charakteristischen Fälle, die je nach Kristallsystem und Schnittrichtung hier beobachtet sind: Den Fall eines einachsigen, senkrecht zur Achse geschnittenen Kristalls (wie es der abgeschliffene Kalkspatrhomboeder, Abb. 55, ist).

In parallelem, senkrecht durchgehendem Lichte (198), würde dieser Kristall gar nichts zeigen, weil er in seiner Achsenrichtung keine Doppelbrechung hat. Hier, im konvergenten Licht, trifft das nur für das mittlere Bündel M zu. Der Punkt m, die Mitte der Erscheinung, wird also wegen der gekreuzten Spate dunkel sein, wie ohne die Platte.

Anders ist es bei den schief durch die Platte gehenden Bündeln, wie N. Je größer ihre Schiefe, desto mehr kommt die Doppelbrechung zur Geltung, außerdem haben sie auch zunehmende Weglängen im Kristall; es werden daher die Erscheinungen von der Mitte aus allmählich zunehmender Gangunterschiede auftreten, wie beim Gipskeil (196), das sind bei weißem Licht Newtons Farben. Dieselben werden hier in kreisförmiger Anordnung um die schwarze Mitte m erscheinen müssen, d. i. wie beim Farbenglas (123); denn es ist für jeden der Kreise dieselbe Neigung der Strahlen zur Achse, also auch derselbe Weg der Strahlen in der Platte vorhanden. Diese Kreisanordnung der Farben ist in Abb. 61b angedeutet, welche die Schirmfläche S S in die Zeichnungsebene gelegt zeigt.

Die Intensität der Farben der Ringe hängt noch von dem Winkel zwischen Hauptschnitt und Schwingungsrichtung P P ab. Nur beim Winkel 45° ist volle Entwickelung der Farben möglich; bei 0° und 90° ist die Platte wirkungslos, d. h. es kann nur die den gekreuzten Spaten entsprechende Dunkelheit auftreten (194). Der Hauptschnitt (184) liegt für die in der Abb. 61a gezeichneten Strahlen in der Zeichnungsebene, da auch die Kristallachse darin liegt; in Abb. 61b stehen die Hauptschnitte aller vorkommenden Strahlen senkrecht zur Zeichnungsebene, wie die Achse. H H gibt z. B. den Hauptschnitt für die Strahlen an, die im

Durchmesser H H, z. B. in n_1 den Schirm treffen. Dieser Hauptschnitt und der zu ihm senkrechte, H_1H_1, erfüllt die Bedingung des Winkels von 45°; längs diesen beiden Durchmessern wird also volle Intensität der Farben vorhanden sein[1]). Gegen die Durchmesser P P und A A hin müssen sich die Farben verdunkeln, und diese letzteren Durchmesser selbst müssen völlig dunkel sein, wie die Mitte m.

Es ergibt sich somit im ganzen ein Ringsystem in Newtons Farben des reflektierten Lichtes mit der schwarzen Mitte, durchzogen von einem schwarzen Kreuz. Dies ist die charakteristische Erscheinung der einachsigen, senkrecht zur Achse geschliffenen Kristalle im konvergenten polarisierten Licht bei gekreuzten Spaten.

Bei parallelen Spaten muß wieder alles komplementär werden (196): Es erscheinen die Ringe in den Farben dünner Blättchen bei durchgelassenem Licht, nur hier in der vollen Sättigung, mit der weißen Mitte, und das Ganze ist durchzogen von einem weißen Kreuze.

201. Beobachtungsweise mit konvergentem polarisiertem Licht. — Auf dem Schirm S S in Abb. 61a würde die Erscheinung nur in kleinem Maßstabe zu sehen sein; man kann sie aber mit einer besonderen Linse beliebig vergrößert auf einem ferneren Schirme Vielen zugleich sichtbar abbilden.

Für den einzelnen Beobachter ist die Turmalinzange (186) besonders geeignet, die man mit dem eingeklemmten Kristall ganz dicht vors Auge hält. Die Linse L in Abb. 61a ist dann die Linse des Auges; S S ist die Netzhaut; der Analysator A A, der eine der Turmaline, ist zwischen K und L gelegt, und P P ist der andere Turmalin; akkommodiert wird auf eine ferne helle Fläche, von deren einzelnen Punkten dann die Bündel M, N kommen.

202. Andere Erscheinungen in konvergentem Licht. — Nach gleichen Überlegungen, wie am eingehend betrachteten Beispiel gezeigt, ergeben sich auch alle anderen, mannigfaltigen Erscheinungen an ein- und zweiachsigen, in verschiedenen Richtungen geschliffenen Kristallen im konvergenten polarisierten Licht. Die Überlegungen werden in verwickelten Fällen, z. B. für zweiachsige Kristalle, in Rechnung ausgeführt. Neue Gesichtspunkte treten dabei nicht auf.

Sämtliche Erscheinungen sind sehr charakteristisch und aufschlußreich für Achsenlage, Achsenwinkel, Stärke der Doppelbrechung irgendeines vorliegenden Präparates und damit auch für dessen Zugehörigkeit zu bestimmtem Kristallsystem, da sie sämtlich schon gut berechnet sind. Als ein besonderes Beispiel seien für die zweiachsigen, senkrecht zur Mittellinie geschnittenen, bei gekreuzten Spaten beobachteten Kristalle die schwarzen Hyperbeln mit den farbigen Lemniskaten erwähnt, die hier an Stelle des Kreuzes und der Kreise der einachsigen Kristalle auftreten. Schon in kleinsten Splittern kann man an diesen Erscheinungen Mineralkristalle, auch in Gesteinsschliffen, erkennen und jeden kristallisiert zu erhaltenden Stoff auf seine Kristalleigenschaften hin untersuchen. Man beobachtet dazu mit dem „Polarisationsmikroskop", das Spate im Beleuchtungsapparat und im Okular hat, übrigens in der bereits erläuterten Weise wirkt (201).

Bei solchen Untersuchungen hat sich auch gezeigt, daß es „flüssige Kristalle" gibt: Flüssigkeiten, in denen zeitweilig kleine oder größere Gruppen von Molekülen durch ihre eigenen Kräfte (M 316) sich ordnen wie in einem festen Kristall, was im Polarisationsmikroskop die für Kristalle charakteristischen Bilder auftreten läßt.

203. Alle in diesem Abschnitt (192—202) behandelten, sehr mannigfaltigen Erscheinungen liefern durch ihre Übereinstimmung mit den angegebenen Überlegungen oder Rechnungen neue Nachweise der Richtigkeit der Grundlagen dieser Überlegungen, nämlich der Wellennatur des Lichtes und der besonderen Formen der Wellenflächen (189, 190) in den Kristallen.

---

[1]) Das Parallelogramm in Abb. 61b hat dieselbe Bedeutung wie in Abb. 60b.

204. Doppelbrechung in nicht kristallisierten Körpern kann vorkommen, wenn sie einseitigem Druck unterworfen sind, wodurch auch die Lichtgeschwindigkeit einseitig beeinflußt wird. Sie zeigen dann Farbenbilder zwischen Spaten im weißen Licht, desselben Ursprungs wie bei den Kristallen (192, 196). So Gläser, die man drückt, oder während Schallwellen sie durchziehen, oder wenn sie von schlechter Kühlung innere Spannungen haben (vgl. W 13). Man beobachtet am besten in parallelem Lichte[1]) (198) bei gekreuzten Spaten; die geringsten Spannungen zeigen sich dann durch Aufhellung des Gesichtsfeldes an der betreffenden Stelle des Probestückes mit dem Blaugrau der 1. Ordnung, stärkere Spannungen mit den Farben höherer Ordnungen (Tab. 39). Es ist dies (neben der Schlierenbeobachtung, 73) ein Mittel, für optische Geräte taugliche Gläser auszusuchen, die nicht doppelbrechend sein dürfen.

e) Drehung der Polarisationsebene.

205. Viele Körper, die keineswegs kristallisiert zu sein brauchen, haben die Eigenschaft, die Schwingungsrichtung polarisierten Lichtes, das sie durchsetzt, um den Strahl als Achse zu verdrehen. Ein Analysator mit Teilkreis macht die Winkelgröße der Verdrehung leicht meßbar, wobei man zur Vergrößerung der Genauigkeit, statt der einfachen Einstellung auf größte Dunkelheit, Erscheinungen in einzuschaltenden Kristallpräparaten zu Hilfe nehmen kann, die schärfere Kennzeichen für die Schwingungsrichtung des Lichtes geben.

206. Zu diesen „optisch drehenden" Stoffen gehört Quarzkristall, der die Drehung bei Durchstrahlung in Richtung seiner optischen Achse zeigt, in welcher Richtung sonstige Kristalle einflußlos das Licht durchlassen. Ein senkrecht zur Achse geschliffener Quarzkristall hellt das dunkle Gesichtsfeld gekreuzter Spate auf, wenn man ihn dazwischen bringt. Dabei macht er weißes Licht farbig. Beobachtet man mit einfarbigem Licht, so findet man, daß die Drehung der Schwingungsrichtung für verschiedene Farben verschieden groß ist („Rotationsdispersion"), für Violett größer als für Rot. Bei weißem polarisiertem Licht entsteht daher aus ursprünglich einheitlicher Schwingungsrichtung ein Bündel verschieden verdrehter Schwingungsrichtungen der verschiedenen Farben im selben Strahl, und aus diesem Bündel nimmt der analysierende Spat je nach der Richtung verschieden große Komponenten der verschiedenen Farben, was Farbengemische ergibt. Dieselben umfassen um so engere Spektralbezirke, je größer die Verdrehung im ganzen ist, d. h. je dicker die drehende Schicht ist, weil dann auch die Schwingungsrichtungen der einzelnen Farben um so weiter auseinanderkommen. Es versteht sich, daß die so entstehenden Farbengemische sehr verschieden sind von den im Vorhergehenden so oft aufgetretenen Farben dünner Blättchen.

Vom gelben Natriumlicht wird die Schwingungsrichtung in 1 mm Quarz um 21·7° gedreht.

Die Drehung kann bei Quarz ebensowohl nach rechts als in dem gleichen Betrag nach links stattfinden, je nach dem Quarzstück. Die Beurteilung des Drehsinns ist stets von der Seite des analysierenden Spats her zu denken. Ob Rechts- oder Linksdrehung bei einem Quarzkristall vorliegt, dies läßt sich bei genügender Ausbildung des Kristalls an gewissen Nebenflächen desselben von vornherein erkennen.

---

[1]) Es entstehen hier bei uneinheitlicher Druckverteilung auch in parallelem Licht von Stelle zu Stelle der Platte verschiedene Gangunterschiede.

207. Auch andere Stoffe gibt es in rechts- und linksdrehender Beschaffenheit, so die Weinsäure in wäßriger Lösung. Man hat hier eine drehende Flüssigkeit. Auch Terpentin, Zuckerlösung und viele andere Lösungen gehören dazu. Bei den Flüssigkeiten ist die Drehung jedenfalls nicht Eigenschaft der Molekülanordnung, die in diesem Aggregatzustand stetem Wechsel durch die Wärmebewegung unterworfen ist, sondern Eigenschaft des einzelnen Moleküls selber.

In dieser Hinsicht gibt das Studium der Drehung einen Weg zur Erforschung des Molekülbaues. Auch zu chemisch-analytischen Zwecken werden Drehungsmessungen benutzt, so zur Ermittelung von Zuckergehalten („optische Saccharimetrie").

208. Fresnel konnte zeigen (1825), daß die Tätigkeit der Moleküle bei der Drehung darin besteht, daß sie die lineare Schwingung des herankommenden polarisierten Lichtes in zwei einander entgegengesetzt zirkular polarisierte Schwingungen (197) zerlegen, welche in dem von den Molekülen erfüllten Raum mit etwas verschiedener Geschwindigkeit laufen und also dann mit einem Phasenunterschied aus dem Raume wieder austreten, so daß sie sich nun zu einer Linearschwingung von verdrehter Richtung wieder zusammensetzen. Der Nachweis hiervon erfolgte durch Trennung der beiden verschieden schnell laufenden Strahlen mittels Brechung bei ihrem Austritt an einer schiefen Fläche.

Für die Moleküle der drehenden Stoffe folgt aus der Kenntnis dieser ihrer eigentümlich zerlegenden Tätigkeit, daß ihre elektrischen Bestandteile in bezug auf Verdrillung einseitig sich verhalten, so daß sie der Verdrillung nach der einen Richtung hin anders folgen als nach der entgegengesetzten Richtung, wobei diese Verdrillungsrichtungen fest verknüpft sich zeigen mit der Richtung des Fortschreitens der Verdrillung (Richtung des Strahles), so wie die Drehrichtung einer Schraube fest verknüpft ist mit der Richtung ihrer Fortbewegung, je nachdem die Schraube ein Rechts- oder Linksgewinde hat[1]).

---

[1]) Hier ist ein Unterschied vorhanden gegenüber der magnetischen Drehung der Polarisationsebene (E 350), bei welcher die Drehrichtung nicht an der Strahlrichtung, sondern am Magnetfelde festliegt.

Erster Teil der Lehre von der Elektrizität:

Elektrostatik
und
Anfänge der Elektrodynamik.

Übersicht.

1. Wir wenden uns jetzt zu Vorgängen, für welche wir ein besonderes Sinnesorgan nicht besitzen. Für Schall, Wärme und noch für das Licht war der Weg über Benutzung des jeweils vorgegebenen Sinnesorgans für die Forschung wenigstens eine Strecke weit vorgezeichnet und leicht gangbar. Elektrizität an sich ist aber allen Sinnen verborgen, und es mußte daher selbst das Bestehen von etwas Besonderem der Art erst auf Umwegen erkannt werden. Alle Erscheinungen, die über Elektrizität und Magnetismus Aufschluß gegeben haben, zeigten den Sinnesorganen jeweils nur kleine Bruchstücke der aus der Gesamtheit der Beobachtungen dann allmählich erschlossenen Vorgänge. Die Hauptsache ist uns verborgen; oft erscheinen nur ganz entfernte Zeichen, Symptome, an die wir uns halten müssen um hinter das Verborgene zu kommen. Daher ist es verständlich, daß die hierher gehörige Kenntnis erst verhältnismäßig spät sich entwickelt hat und daß dabei zeitweilig große Umwege nicht zu vermeiden waren, sowie auch daß dieser Teil der Physik immer noch weit weniger abgeschlossen ist als alle übrigen Teile.

Dabei ist es merkwürdig, daß die bisher erlangte Kenntnis zeigt, daß geradezu alle Vorgänge in der unbelebten Natur elektrischer Art sind, daß also die so spät und schwer erkennbar gewordenen Dinge eine weit größere, umfassendere Rolle spielen, als man lange auch nur ahnen konnte. So haben wir schon in der Optik von vornherein das Licht als einen elektrischen Vorgang erklärt, und in der Mechanik und auch sonst war schon wiederholt auf den Aufbau der Atome der Materie aus den Elektrizitäten hinzuweisen, um Treffendes schnell sagen zu können. Auch wird noch zu zeigen sein, wie die bei allen Naturvorgängen so grundwichtige Energie in allen ihren Formen — soweit zu sehen — zu elektromagnetischen Kraftfeldern gehört und daß damit auch die allwirksame Gravitation — als Energieeigenschaft gedacht (M 214) — elektromagnetisch bedingt erscheint (579 u. f.). Eine große Einheitlichkeit scheint so über das Naturbegreifen zu kommen, und dies darf vielleicht einiges Vertrauen geben zur Richtigkeit auch dieser Ausläufer im Werden begriffener Erkenntnis, die wir nur kurz behandeln. Alles hängt dabei an den Fragen des Atominneren. In den kleinen Atomräumen finden sich größte Energiemengen verdichtet (580); diesen Räumen ist auch alle Elektrizität entnommen, die wir benutzen, und alle elektromagnetischen Kraftfelder der vielen Anwendungen entstammen dieser Quelle (129, 520 u. f.). Eben das Atominnere muß man aber bis jetzt als so gut wie unberührt von gesicherter Kenntnis bezeichnen (s. 534 u. f., 546), wenn man nicht hier den strengen Maßstab plötzlich verlassen will, den sonst der ganze Inhalt der Physik mit Einschluß der Elektrostatik und Elektrodynamik gut verträgt. Es sind hier die — verwaschenen — Grenzen gesicherten Wissens erreicht.

Der historischen Entwickelung der Kenntnis folgen wir insoweit, als die kenntnisbegründenden und sichernden Untersuchungen überall hervorzuheben

ſind. Doch werden wir öfter vorgreifen, um Umwege und Wiederholungen in der Darſtellung zu vermeiden und möglichſt von vornherein gute Kenntniſſe mitzuteilen. Am meiſten erforderlich iſt alsbaldiges Mitwirkenlaſſen der ſchon gut geſicherten Kenntnis von den Elementarquanten der Elektrizität, beſonders von den Elektronen. Obgleich aus ſpäter Zeit ſtammend und daher erſt in den ſpäteren Teilen der Elektrizitätslehre zu begründen (193, 452 u. f.), ſind doch dieſe Kenntniſſe ſo förderlich für die Vereinheitlichung des Verſtändniſſes auch altbekannter Dinge, daß ohne ihre Mitbenutzung an ſehr vielen Stellen Treffendes in kurzer Weiſe gar nicht geſagt werden könnte. Auch die erſt am Schluſſe zu begründenden neueren Erkenntniſſe über die Energie (434 u. f.) werden wir bald erläuternd mitwirken laſſen, wie es auch ſchon in den anderen Teilen des Werkes geſchehen iſt.

Wir beginnen hier mit der Elektrizität. Den Magnetismus, auf deſſen Kenntnis die Hauptentwickelung der Elektrodynamik beruht, behandeln wir zuſammen mit dieſer im IV. Bande; den Schluß desſelben bilden die „Anfänge von Weiterem“.

I. Elektrostatik
oder Kenntnisse von der ruhenden Elektrizität.

a) Grundkenntnisse.

2. Die Elektrizität. Der Anfang der Kenntnis findet sich im Altertum. Den Hellenen war der Bernstein, das fossile Harz bekannt, von ihnen Elektron genannt, und sie bemerkten, daß er, mit geeignetem Gewebe gerieben, die Fähigkeit erlangt, leichte Körperchen an sich zu ziehen. Erst spät (1600) wußte Gilbert noch andere Stoffe aufzuzählen, Harze wie Siegellack, auch Schwefel, Glas, Edelsteine, die beim Reiben auch jene Eigenschaft des Bernsteines erhalten, „elektrisch" werden. Guericke (1670) befestigte eine große Schwefelkugel drehbar an einer Achse mit Kurbel, damit sie leicht gerieben werden konnte, und förderte mit dieser ersten „Reibelektrisiermaschine" alle weiteren Untersuchungen. Zum Nachweis der hier schon stärkeren „elektrischen Kräfte" wandte er Holundermarkkügelchen an. Eine solche Kugel (H, Abb. 62), an einem Leinenfaden aufgehängt, wird von dem ihr genäherten elektrischen Körper M angezogen. Diese Kräfte schrieb man früh einem Etwas zu, das an den elektrischen Körpern sitze und das man „Elektrizität" nannte und noch nennt.

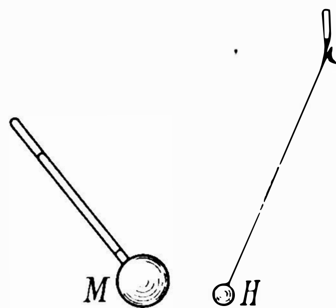


Abb. 62. Elektrische Anziehung (und Abstoßung).

Sinnlich wahrnehmbar ist diese Elektrizität nicht; nur ihre Wirkungen, die Kräfte, werden als Symptome ihres Daseins merkbar. Es war lange — mehr als 200 Jahre lang nach Guericke — zweifelhaft geblieben, was von der Elektrizität zu denken sei, ob sie als ein besonderer, etwa unwägbarer Stoff aufzufassen sei, oder ob sie vielleicht — wie in der Tat nach späterer Erkenntnis der Magnetismus — gar nicht stoffartig, sondern nur ein Zustand sei, den man auch vernichten, beseitigen kann; erst spät (seit 1894) ist durch das Studium der Kathodenstrahlen die Elektrizität an sich, auch abgetrennt von Materie erforschbar geworden (452 u. f.). Man weiß auch — wie zeitweilig schon vorher vermutet (193) —, daß sie in „Elementarquanten", manchmal kurz „elektrische Quanten" zu nennen, abgeteilt vorgegeben ist, wie die Materie in Atomen, und daß jede Elektrizitätsmenge, die irgendwo sich findet, aus einer Anzahl — die meist sehr groß ist — dieser in Mengeneinheiten gut gemessenen Elementarquanten besteht (194, 195).

3. Die elektrischen Kräfte wirken durch den von Materie freien Raum, was schon Boyle mit Guerickes Luftpumpe zeigte. Wir werden dementsprechend diese Kräfte später als durch Äthergebilde bewirkt betrachten (129).

Es gilt für die elektrischen Kräfte das allgemeine Gesetz (M 209) des paarweisen Vorhandenseins von *Kraft und Gegenkraft* und deren Gleichheit. Nicht nur der elektrische Körper zieht den unelektrischen an, sondern auch umgekehrt der unelektrische den elektrischen. Man kann dies an einer leicht beweglichen Kollodiumhaut sehen, die man zwischen Papier reibend hervorgezogen hat: sie wird von der unelektrischen Hand angezogen (s. weiter 14, 16 u. f.).

4. *Leiter und Nichtleiter; Isolation.* — Berührt man eine an geeignetem Stiel (etwa aus Glas) zu haltende Metallkugel M (Abb. 62) mit einem durch Reiben elektrisch gemachten Körper, so wird sie auch elektrisch: sie zieht dann auch das Holundermarkpendel H an. Die Elektrizität ist also von dem einen Körper auf den anderen übergegangen. Sie hat sich auf der ganzen Metallkugel verbreitet, ja sie kann auch auf sehr große Strecken längs Schnüren oder Drähten sich verbreiten (Gray 1729), sie kann „*fließen*“. Jedoch muß man, um dies nachzuweisen, verhindern, daß sie „*zur Erde abfließt*“ und dadurch verschwindet. Dies gelingt; denn es gibt außer den „Leitern“, die das Fließen der Elektrizität gestatten, auch „Nichtleiter“, die es verhindern.

Zu den *Leitern* gehören alle Metalle, zu den *Nichtleitern* Glas, Seide, Schellack, Bernstein. Der Unterschied zwischen Leitern und Nichtleitern ist aber nur graduell; er kann in Zahlen bemessen werden durch das „Leitvermögen“ oder dessen Reziprokes, den „spezifischen Widerstand“, wovon Tab. 44 (s. 157) Beispiele zeigt. Wir gehen später auf das Quantitative ein (6, 146 u. f.); die Zahlen sollen für jetzt nur zeigen, daß die Unterschiede immerhin sehr groß sind.

Der menschliche Körper leitet gut genug, um Elektrizitätsmengen wie die auf der Kugel M (Abb. 62) schnell zur Erde gelangen zu lassen: Berührung der „*geladenen*“ Kugel mit dem Finger macht sogleich ihre Anziehungskräfte verschwinden; sie wird „*entladen*“. Ihr Stiel muß zu diesen Versuchen stets aus einem Nichtleiter bestehen.

Die Luft gehört zu den Nichtleitern oder doch sehr schlechten Leitern (vgl. 14), andernfalls wären alle bisher gedachten Versuche unmöglich gewesen; ja man sieht, daß überhaupt die Entdeckung der elektrischen Erscheinungen sonst gewiß erst sehr viel späteren Zeiten vorbehalten gewesen wäre.

Ist ein Körper rings von Nichtleitern umgeben, wie die Kugel M in Abb. 62, so daß die Elektrizität nicht von ihm fortfließen kann, so sagt man, er ist „*isoliert*“. Ein Nichtleiter oder genügend schlechter Leiter in solcher Anwendung wird „*Isolator*“ genannt.

Alle die genannten Körper, die durch Reiben gut elektrisch werden, sind Nichtleiter; man kann deshalb die zu reibende Glasstange, Siegellackstange usw. unmittelbar in der Hand halten, ohne die Elektrisierung zu beeinträchtigen. Man kann aber dementsprechend eine geriebene Siegellackstange auch nicht — wie die Metallkugel — durch Berühren mit dem Finger entladen; es kann bei der Berührung nur die am berührten Oberflächenteil der Stange befindliche Elektrizität zur Erde fließen. Bei gleicher Berührung einer Metallkugel erfolgt dagegen vollständige Entladung, so daß sie gar keine elektrischen Kräfte mehr zeigt, weil die Elektrizität im Leiter von einer Stelle zur anderen fließen kann. Um die geriebene Siegellackstange vollständig zu entladen, kann man sie an ihrer ganzen Oberfläche mit der Hand abstreifen. Noch schneller und vollständiger geht es, wenn man die Stange durch eine Bunsenflamme zieht. *Flammen*,

genügend heiße Gase, sind verhältnismäßig gute Leiter, etwa wie Holz oder Leinen, die man auch nicht als gute Isolatoren brauchen kann.

Glas und ähnliche Körper können übrigens auch mangelhafte Isolatoren sein, ohne selbst Leitvermögen zu besitzen, wenn sie nämlich an ihrer Oberfläche Feuchtigkeit aus der Luft verdichtet haben; es leitet dann die Oberflächenschicht; denn (nicht äußerst reines) Wasser oder gar Salzlösungen leiten verhältnismäßig gut, so wie auch der menschliche Körper.

5. Elektrische Abstoßung. — Schon Guericke bemerkte, daß die elektrische Anziehung in Abstoßung übergehen kann. Hängt die Holundermarkkugel (H, Abb. 62) an einem isolierenden Seidenfaden, statt am Leinenfaden, so wird sie nach anfänglicher Anziehung sofort vom elektrischen Körper M (Metallkugel oder Siegellackstange) abgestoßen, wenn sie ihn einen Augenblick berührt hat. Sie wird bei der Berührung durch Leitung auch elektrisch und bleibt es, weil sie am Seidenfaden isoliert ist, und es ist offenbar die Elektrizität selber, die — nun auf M und H befindlich — sich abstößt. Entlädt man H durch Berührung mit dem Finger, so erfolgt sogleich wieder Anziehung, worauf sich, nach erfolgter Berührung von M und H, die Abstoßung wiederholt.

6. Elektroskope. — Die gegenseitige Abstoßung der Elektrizität kommt auch in den „Elektroskopen" zur Geltung, die schon Volta hatte (vor 1800) und die heute noch weiter verfeinert sind (Abb. 63). Hauptsache sind die beiden leichten Leiterstreifen a b, meist Aluminiumblätter, die bei b an dem leitenden Stiel b B befestigt sind. Bernstein, als bester Isolator (schraffiert) hält das Ganze im Halse einer Flasche, die nicht isolieren, sondern nur die Blätter vor Luftzug schützen soll (vgl. 35). Eine kleine glockenförmige Kappe k k schützt vorteilhaft den Isolator vor schädlicher Berührung, die ihn feucht machen könnte.

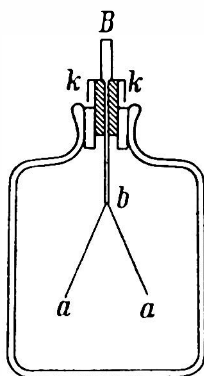


Abb. 63. Elektroskop.

Hat man das Elektroskop elektrisch geladen, etwa durch Berührung von B mit einer geriebenen Siegellackstange oder auch Glasstange, so divergieren die Blätter (wie in der Abbildung), und sie bleiben dann dauernd in Divergenz, wenn die Isolation vollkommen ist. Berührung von B mit dem Finger macht sofort die Blätter zusammenfallen; die Ladung des Elektroskops ist dann zur Erde abgeflossen. Zu gut gesicherter Erdableitung benutzt man einen Draht, der metallisch mit einem Gas- oder Wasserleitungsrohr verbunden ist.

Berührt man das geladene Elektroskop mit einem Körper — z. B. Seidenschnur, Holz, Leinenfaden —, den man am anderen Ende in der Hand hält, so kann man aus der Zeit, die die Blätter zum Zusammenfallen über eine gewisse Strecke brauchen, ein Maß für die Güte der Isolation des betreffenden Körpers, für seinen Leitungs-„Widerstand", gewinnen, der das Reziproke seines „Leitvermögens" ist (4). Man kann aber so nur die ganz schlechten Leiter miteinander vergleichen; alle einigermaßen guten Leiter — wie metallische Körper irgendwelcher Art — lassen die bei diesen Versuchen zur Verwendung kommenden kleinen Elektrizitätsmengen viel schneller zur Erde gehen als die Blätter des Elektroskops folgen könnten.

7. Zwei Elektrizitäten. — Hat man die Holundermarkkugel H (Abb. 62) am Seidenfaden von der geriebenen Siegellackstange geladen, so daß sie von dieser abgestoßen wird (5), und nähert man ihr eine geriebene Glasstange, so wird sie nicht abgestoßen, sondern angezogen. Umgekehrt, ist sie von der Glasstange geladen und also von dieser abgestoßen, so wird sie von der Siegellackstange angezogen. Die Elektrizität der Siegellackstange verhält sich also entgegengesetzt der der Glasstange. Was die eine abstößt, zieht die andere an. Beide stoßen ihresgleichen ab, ziehen aber einander an (Du Fay, 1733).

Es gibt also zweierlei Elektrizitäten; das Wunder „Elektrizität" ist doppelt vorhanden! Jede der beiden Elektrizitäten zeigt alle schon vorher behandelten Eigenschaften: die Anziehung der unelektrischen Körper, das Fließen auf den Leitern, das Festsitzen an den Nichtleitern; sie geben gleiche Divergenzen am Elektroskop. Einander sind sie aber in der angegebenen Weise entgegengesetzt. Man bezeichnet sie daher auch als „Positiv" und „Negativ", oder mit plus (+) und minus (—), und zwar wird eindeutig — wenn auch ursprünglich ganz willkürlich — stets die Glaselektrizität als positiv bezeichnet, die Harzelektrizität als negativ.

Es geben übrigens fast alle zur Reibelektrisierung gebräuchlichen Körper negative Elektrizität, jeder mit geeignetem Reibzeug, wie Siegellack mit Katzenfell, Schwefel mit Tuch, Bernstein, auch Hartgummi mit Seide; Glas, am besten mit amalgamiertem Leder gerieben, wird positiv elektrisch.

Für beide Elektrizitäten trifft es zu, was wir voranstellten (2), daß sie in Elementarquanten abgeteilt vorgegeben sind. Es gibt also positiv und negativ elektrische Elementarquanten.

Divergiert ein Elektroskop und will man erfahren, welches Zeichens seine Ladung ist, so nähert man ihm eine geriebene Siegellackstange. Vermehrt dies die Divergenz, so ist die Ladung gleichen Zeichens mit der Stange, also negativ; vermindert sich die Divergenz, so ist die Ladung positiv. Wegnehmen der genäherten Stange stellt (bei guter Isolation) in jedem Falle wieder die frühere Divergenz her. Dieselbe Probe kann auch mit einer Glasstange gemacht werden; Vermehrung der Divergenz bedeutet dann positive, Verminderung negative Ladung.

8. Gegenseitige Neutralisation und Bindung der beiden Elektrizitäten. — Bei dem gegensätzlichen Verhalten der beiden Elektrizitäten ist es zu erwarten, daß sie in ihren Wirkungen einander vernichten werden, wenn sie beide in gleicher Menge auf denselben Körper gebracht werden. Dies trifft auch zu, und man definiert eben solche Mengen verschiedenen Zeichens, die in dieser Weise einander unwirksam machen — und die man anders auch nicht so einfach vergleichen könnte — als „gleiche" Mengen. Es ist durch die Erscheinungen der Elektrolyse (171 u. f., besonders 193) gesichert, daß so definierte gleiche Mengen gleichviel Elementarquanten der beiden Elektrizitäten enthalten.

Den Versuch, beide Elektrizitäten auf denselben Körper zu laden, kann man mit einem Elektroskop ausführen. Man lade es von einer Siegellackstange negativ zu guter Divergenz und berühre es dann mit einer schwach geriebenen Glasstange. Dies vermindert bleibend die Divergenz, und die Wiederholung solcher Berührung bringt weitere Verminderung hervor, bis schließlich die Blätter ganz beisammen sind und das Elektroskop in jeder Beziehung als unelektrisch sich

erweist. Wiederholt man nun weiter die Berührung mit der schwach geriebenen Glasstange, so tritt neue Divergenz am Elektroskop auf, diesmal aber mit dem der ursprünglichen Ladung entgegengesetzten, nämlich positiven Vorzeichen; es ist jetzt mehr als die gleiche Menge positiver Elektrizität zur ursprünglichen Menge der negativen Elektrizität hinzugefügt, und der Überschuß zeigt sich als die schließliche positive Ladung.

Man kann den Versuch auch mit zwei gleichen Elektroskopen ausführen, die man zuerst zu gleichen Divergenzen, aber mit entgegengesetztem Zeichen auflädt, das eine mit Glas, das andere mit Harz. Stellt man dann mittels eines an isolierender Handhabe gehaltenen Drahtes leitende Verbindung zwischen beiden Elektroskopen her, so erfolgt spurloses Verschwinden beider Divergenzen.

Solche Versuche erinnern ganz an die Neutralisierung von Säuren mit Basen. Diese beiden Stoffe vernichten einander nicht; es verschwinden nur ihre Wirkungen nach außen, etwa auf Lackmus, das dann weder rot noch blau wird. Ebenso ist es nach gesamter Erfahrung auch bei den beiden Elektrizitäten zu denken. Sie vernichten einander keineswegs; man hat nie ein Verschwinden von Elementarquanten der Elektrizität nachweisen können. Je zwei Elementarquanten beiderlei Zeichens „neutralisieren" einander nur in der Wirkung nach außen; sie „binden" einander, kann man auch sagen, was insofern angebracht ist, als die Anziehungskräfte entgegengesetzter Elektrizitäten sie in der Tat miteinander verbinden, auch wenn sie nicht bis auf verschwindend kleine Abstände vereinigt sind.

9. Alle Körper enthalten Unmengen von beiden Elektrizitäten. — Da Körper, denen gleichviel positive und negative Elektrizität zugeführt worden ist, gänzlich unelektrisch erscheinen, aber doch die zugeführten Elektrizitäten enthalten sollen, ist es fraglich, ob nicht jeder unelektrische Körper schon von vornherein beide Elektrizitäten, allerdings in gleicher Menge, enthält. Er könnte sogar sehr viel von beiden enthalten, ohne daß es merklich würde. Daß das letztere tatsächlich der Fall ist, dies zeigt die alsbald zu behandelnde, schon früh erkannte Erscheinung der Influenz (18). Immerhin war es lange nicht einzusehen, was diese Anhäufungen der an sich fraglichen Elektrizitäten in allen Körpern mit deren Atomen zu tun haben sollten, als deren sonderbare Begleiter sie am geladenen Körper erscheinen. Dies ist durch die schon erwähnten Untersuchungen über die Elektrizität an sich (2) in der einfachsten Weise aufgeklärt: Die Elementarquanten der beiden Elektrizitäten sind wesentliche Bestandteile der Atome selber — aller Atome — und somit ohne Zweifel in sehr großer Menge in jedem Körper vorrätig, so wie die Zahl seiner Atome sehr groß ist. Ja es gibt überhaupt keine Elektrizität, die nicht aus Atomen genommen wäre oder zu Atomen gehörte (520 u. f.).

Wir haben daher einen elektrisch geladenen Körper dahin aufzufassen, daß er neben den zu seinen Atomen gehörenden Elementarquanten beiderlei Zeichens noch einen Überschuß von einem Zeichen enthält. Man sagt dann auch zutreffend: der Körper habe „freie Elektrizität".

10. Keine Erzeugung von Elektrizität. — Ebensowenig als Vernichtung von elektrischen Quanten beobachtet ist, ist auch Erzeugung derselben bekannt. Es ist ganz allgemeine Erfahrung, daß „Erzeugung" von Elektrizität nur Trennung schon vorhandener Mengen der beiden entgegen-

gesetzten Elektrizitäten ist. Es wird nämlich niemals eine Elektrizitätsart für sich allein gewonnen, sondern es erscheinen immer beide Elektrizitäten in gleichen Mengen gleichzeitig. Wir verfolgen dies hier sogleich bei der ältest bekannten Elektrizitätsquelle, der Reibung; es gilt aber auch für alle anderen Elektrizitätsquellen (Influenz 21, Elektrizität aller Doppelschichten und Elemente 131 u. f., 208 u. f., Induktion 333 u. f.).

Wenn der geriebene Körper die Elektrizität des einen Zeichens im Überschuß zeigt, so kann die Elektrizität des anderen Zeichens am Reibzeug gefunden werden. Hält man, wie gewöhnlich, das Reibzeug in der Hand, so kann allerdings seine Elektrizität zur Erde abfließen. Versieht man aber beispielsweise eine Schwefelstange S (Abb. 64) mit einer Tuchkappe K, an der sie gerieben werden kann und die einen Seidenfaden F trägt, so kann man nach geschehener Reibung die Kappe isoliert an dem Seidenfaden abziehen und leicht ihre Ladung am Elektroskop nachweisen; sie ist positiv, während die Schwefelstange negativ sich zeigt.

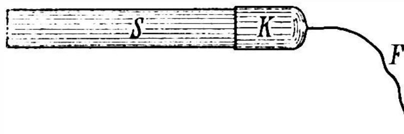


Abb. 64. Geriebener Körper und Reibzeug entgegengesetzt elektrisch.

Bei der Reibung selbst kann man die Kappe gut in der Hand halten; sie verliert ihre Ladung nicht, solange sie noch dicht beim Schwefel ist; denn letzterer hält seine negative Ladung als guter Nichtleiter sehr fest, und diese hält die positive der Kappe gebunden. Man kann dann vor Abziehen der Kappe das Ganze auch ans Elektroskop bringen ohne eine Divergenz zu bekommen, zum Zeichen, daß die beiden entgegengesetzten Elektrizitäten in gleicher Menge da sind. Erst nach Abziehen der Kappe werden sie beide frei (9) und damit am Elektroskop nachweisbar.

11. Unbestimmtheit der Elektrizitätsbewegungen. — Nun liegt aber noch eine Frage vor, die lange sehr schwierig und verwirrend war. Wenn nämlich der geriebene Körper, z. B. Schwefel, negativ, das Reibzeug positiv elektrisch wird, so könnte das so sein, daß positive Elektrizität vom Schwefel beim Reiben in das Reibzeug übergetreten ist; es könnte aber auch so sein, daß negative Elektrizität vom Reibzeug in den Schwefel gegangen ist. Beides würde das beobachtete Endergebnis zur Folge haben, und es gibt keine unmittelbare Entscheidung zwischen den beiden Möglichkeiten oder — was auch sein könnte — einem Gemisch beider.

In der Tat gibt es auch sonst viele Fälle, die uns noch begegnen werden, wo keine unmittelbare Möglichkeit vorliegt, zu entscheiden, ob positive Elektrizität nach der einen Seite hin sich bewegt, oder negative nach der entgegengesetzten Seite (vgl. 148). Es sind nämlich fast in allen Fällen die beobachtbaren Symptome der beiden Vorgänge genau die gleichen, und auch das Endergebnis ist, wenn auch nicht das gleiche, so doch für gewöhnlich wegen des großen Überschusses der Elektrizitäten beiderlei Zeichens ununterscheidbar dasselbe.

Insofern die beiden Vorgänge die gleichen wahrnehmbaren Folgen haben, kann man der Kürze des Ausdrucks halber auch in Fällen, die heute schon geklärt sind, es unterlassen, sie besonders zu unterscheiden, was sehr lange Zeit hindurch

auch gar nicht anders möglich gewesen ist und was daher teilweise im Sprachgebrauch sogar fest eingebürgert ist (vgl. 13).

12. Artunterschiede der beiden Elektrizitäten; Elektronen. — Es sei aber gleich hervorgehoben, was der Verfolg der schon öfter genannten neueren Untersuchungen (438 u. f.) in der Hauptsache zur vorliegenden Frage gezeigt hat: Negative Elektrizität ist verhältnismäßig leicht von Materie vollkommen abtrennbar; positive Elektrizität sitzt sehr fest an den Atomen, deren bleibendster Bestandteil sie ist. Wo negative Elektrizität von einem Körper weggeht, braucht er kein einziges seiner Atome verloren zu haben; wo aber positive Elektrizität weggeht, gehen wohl immer auch Atome mit oder sie sind vielleicht gänzlich verändert. Das Mitgehen von Atomen wird immer nachweisbar, wenn die betreffenden Elektrizitätsmengen nicht zu klein sind.

Man kennt die negative Elektrizität viel besser als die positive, und es ist daher für die Elementarquanten (2) der negativen Elektrizität auch ein eindeutiger Name in festen Gebrauch gekommen; man nennt sie „Elektronen". Elektronen sind außerhalb der Materie — im Vakuum — frei für sich gefunden und schon weitgehend untersucht (452 u. f.); sie sind dementsprechend auch schon in technische Anwendung gekommen (477).

13. In metallischen Leitern sind stets Elektronen, die den Atomen des Metalles zugehören, frei beweglich anzunehmen, entsprechend der guten Elektrizitätsleitung der Metalle und der leichten Beweglichkeit (geringen Masse) der Elektronen. Die Tatsache der Abtrennbarkeit von Elektronen aus Atomen, besonders leicht aus Metallatomen, ist nachgewiesen durch die lichtelektrische Wirkung, sekundäre Kathodenstrahlung, Elektrizitätsleitung in Flammen und die glühelektrische Wirkung (s. besonders 466, 472, 510)[1]).

Aus dem Metall in die Luft oder auch ins Vakuum entweichen die Elektronen (bei gewöhnlicher Temperatur) nicht von selber; sie können aber wohl in einen angrenzenden Körper, besonders leicht in ein angrenzendes Metallstück übertreten (vgl. 53), und dies ist — soviel man weiß — der Vorgang des Elektrizitätsaustausches längs metallischen Leitungen. (Über die Beteiligung der Metallatome s. 221, 318).

„Lädt man" das Elektroskop von einer geriebenen Glasstange „positiv auf", so ist demnach der Vorgang nur der, daß Elektronen aus dem Metall des Elektroskops an die Glasstange gehen, die dann im Metall fehlen, was seine nun freie positive Ladung ausmacht, während sie den berührten Teil der Glasoberfläche elektrisch neutral machen, „entladen". Und „leitet man die positive Ladung" des Elektroskops durch einen Draht „zur Erde ab", so ist der Vorgang nur der, daß die im Elektroskop fehlenden Elektronen ihm wieder zurückgegeben werden.

Es ist, wie man an diesem Beispiele sieht, sehr vereinfachend im Wortausdruck, wenn man, je nach dem Fall, vom Fließen oder Geleitetwerden sei es der positiven oder auch der negativen Elektrizität spricht, ohne Rücksicht darauf zu nehmen, daß es — soweit bekannt — in den gewöhnlich benutzten Metallkörpern und Drähten immer nur die negative Elektrizität ist, die von der Stelle geht (vgl. 221).

Wir dürfen nach dieser Erklärung die schon eingebürgerte einfache Ausdrucksweise benutzen, ohne gegen vorhandene Kenntnis zu verstoßen, auf welche wir übrigens in besonderen Fällen immer wieder Bezug nehmen werden (vgl. 86, 318). Es ist im übrigen gut, über die Vorgänge der Elektrizitätsleitung in Metallen nicht zu viel Bestimmtes zu sagen, da man über deren Einzelheiten noch wenig unterrichtet ist.

14. Coulombs Gesetz. — Die Anziehung der entgegengesetzten und die Abstoßung der gleichnamigen Elektrizitäten ist von Coulomb — nachdem er die Gesetze der Drillkräfte in Drähten festgestellt hatte (M 271) — quantitativ mit der Drehwaage (Abb. 65) untersucht worden (1785).

Der Glasbehälter G G, welcher nach oben in das Glasrohr g sich fortsetzt, enthält den oben drehbar befestigten dünnen Draht mit dem daran hängenden

[1]) Einen besonderen Nachweis der freien Elektronen in Metallen s. in E 511, Fußnote.

leichten, isolierenden horizontalen Arm, der die leitende, kleine Kugel a und andererseits ein Gegengewicht trägt. Die Kugel kann elektrisch geladen werden. Neben ihr ist die zweite Kugel b an isolierendem Stiel einzuführen, die ebenfalls geladen werden kann. Es kann nun der anziehenden oder abstoßenden Kraft, welche zwischen den beiden Kugeln vermöge ihrer Ladungen auftritt, durch geeignete Verdrillung des Drahtes an seinem oberen Ende stets das Gleichgewicht gehalten werden, so daß die Kugeln einen bestimmten Abstand einhalten. Zu jedem Abstand (und jeder Ladung) der Kugeln gehört eine bestimmte Verdrillung, welche durch die obere und eine untere Ablesung (an nicht dargestellter, am Gehäuse angebrachter Teilung) festgestellt werden kann und welcher die zu messende Kraft proportional ist.

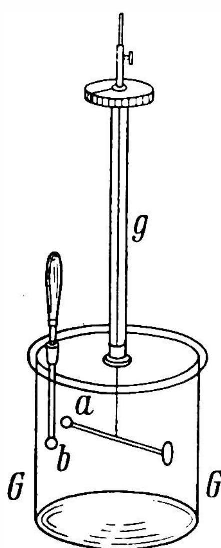


Abb. 65. Coulombs Drehwaage.

In dieser Weise gelangte Coulomb zu dem Kraftgesetz, dessen Inhalt durch Abb. 66 dargestellt ist: Je 2 (räumlich eng verteilte, „punktförmige") Elektrizitätsmengen wirken mit einer Kraft (und einer ihr gleichen Gegenkraft, 3) aufeinander, die dem Produkt beider Mengen proportional und dem Quadrat ihres Abstands voneinander verkehrt proportional ist. Man kann statt der Proportionalität die Gleichheit setzen (wie in der Abbildung), wenn man die Einheiten für Kräfte, Längen und Elektrizitätsmengen passend wählt (s. 15).

Die Elektrizitätsmengen e_1 und e_2 sind zur Berechnung der Kräfte mit ihren Vorzeichen (7) in das Gesetz einzusetzen; haben beide Elektrizitätsmengen gleiches Vorzeichen, so ist ihr Produkt positiv, und positive Kraft ist daher als Abstoßung zu deuten, negative als Anziehung.

Coulombs Gesetz war die erste quantitative Beziehung innerhalb der Kenntnis von den Elektrizitäten. Bis dahin waren die Vorstellungen von den Kräften der Elektrizitäten unklar; man sprach von einer elektrischen Atmosphäre, die jeder geladene Körper um sich verbreite, ohne damit feste, maßmäßig faßbare Vorstellungen zu verbinden. Demgegenüber erfolgte eine große Vereinfachung, eine Übertragung von Unbestimmtem ins durchaus Bestimmte und eine einheitliche Zusammenfassung vieler allmählich schon erkannter Einzelheiten, als Coulomb sein Gesetz auf feine Messungen begründet verkünden konnte. Von diesem ersten quantitativen Gesetz aus entwickelte und vermehrte sich die Kenntnis elektrischer Erscheinungen auch sehr rasch und in ganz unerwarteter Weise weiter. Es war nun allgemein zu sehen, daß nicht bloß merkwürdige, sondern auch scharf erfaßbare Vorgänge vorlagen.

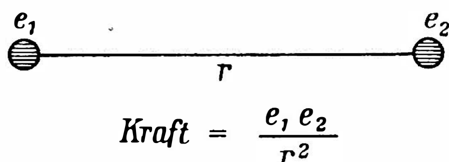


Abb. 66. Coulombs Gesetz.

Coulombs Experimentierkunst ist den damals noch vorliegenden Schwierigkeiten gegenüber sehr zu bewundern. Er mußte beispielsweise die wegen Iso-

lationsmängeln stets unvermeidlichen allmählichen Elektrizitätsverluste der Kugeln in der Drehwaage in Rechnung ziehen, wobei er überhaupt erst fand, daß selbst die Luft kein ganz vollkommener Isolator ist.

Das einmal gefundene Gesetz hat reichliche Bewährungen in viel Anwendungen erhalten, die große Teile der Elektrostatik füllen. Außerdem hat auch schon Coulomb selbst einen Weg gefunden, das Gesetz in sehr einfacher Weise und zugleich mit einer Genauigkeit geltend zu zeigen, die durch unmittelbare Messungen niemals erreichbar gewesen wäre (s. 40).

Die später erkennbar gewordenen Gültigkeitsgrenzen des Gesetzes behandeln wir unter 61, 108, 422.

Das Gesetz paßt vollkommen zur Gesamtkenntnis von Wirkungen, die allseitig von Punkten (kleinen Raumstellen) ausgehen; alle solche Wirkungen sind nach dem Gesetz des verkehrten Entfernungsquadrates räumlich verteilt. Ein großes Beispiel hierfür war sogar schon 100 Jahre vor Coulomb von Newton im Gravitationsgesetz gegeben (M 205), und noch früher schon hatte Kepler dasselbe Gesetz für die Lichtausbreitung gültig gezeigt (O 16).

15. Einheiten für Elektrizitätsmengen. — Will man mit Coulombs Gesetz rechnen, so muß man die Elektrizitätsmengen zahlenmäßig angeben können, wozu eine Einheit für Elektrizitätsmengen erforderlich ist (vgl. M 5). Wir führen hier sogleich die heute allgemein gebräuchliche Einheit ein, wie wir das auch für die ferner auftretenden elektrischen Größen tun werden, obgleich der Ursprung dieser Einheiten erst später zu erörtern ist (262 u. f.). Die gebräuchliche Einheit der Elektrizitätsmenge ist das „Coulomb"; sie ist Coulomb zu Ehren so benannt, aber nicht von seinem Gesetze genommen; sie gehört zur großen Gruppe der „absoluten elektromagnetischen Einheiten" (s. Tab. 50).

Das Coulomb ist eine sehr große Einheit. Stellte man dieser Elektrizitätsmenge 1 Coulomb eine ihr gleiche im Abstande von 1 m gegenüber, so ergäbe das eine Abstoßungskraft von 920 Millionen Kilogramm. Es ist danach klar, daß die Elektrizitätsmengen der bisher von uns betrachteten Versuche unter 1 Milliontel Coulomb gewesen sind.

Man kann aber auch aus Coulombs Gesetz eine Einheit der Elektrizitätsmenge herleiten: Es ist das diejenige Elektrizitätsmenge, welche eine ihr gleiche in der Entfernung der Längeneinheit mit der Krafteinheit abstößt. Nimmt man dabei als Längeneinheit das cm und als Krafteinheit die absolute CGS-Krafteinheit, das dyn (die etwa 1 mgr-Gewicht irdisch ist, M 192), so hat man die „absolute elektrostatische CGS-Mengeneinheit" (264). Dies ist eine ziemlich kleine Einheit ($=\frac{1}{3}10^{-9}$ Coulomb); sie wird besonders bei Rechnungen über ruhende Elektrizität angewandt.

Die naturgegebene Mengeneinheit wäre das elektrische Elementarquant, bei negativer Elektrizität das Elektron, als die kleinste bekannte, soviel man weiß überall in gleicher Größe auftretende Menge, eine allerdings außerordentlich kleine, aber gut festgestellte Menge (vgl. 194, 195). Es wäre das auch die Mengeneinheit, deren Unveränderlichkeit am besten gesichert erscheint. Es war aber das Coulomb schon lange gut festgelegt und in Gebrauch genommen, ehe das Elementarquant als allgemein alle Elektrizitätsmengen zusammensetzend und somit grundlegend wichtig erkannt werden konnte.

b) Verstehen der Erscheinungen nach Coulombs Gesetz.

Aus Coulombs Gesetz finden alle Erscheinungen ruhender[1]) Elektrizität ihre quantitative Erklärung, soweit die Kräfte durch den leeren Raum (oder Luft) wirken, wie es meistens der Fall ist, und wir entwickeln in diesem Abschnitt den einfacheren Teil der Elektrostatik, der in der Tat ganz aus Coulombs Gesetz sich entwickelt hat.

Influenz.

16. Kräfte elektrischer Ladung auf unelektrische Körper. — Zur Berechnung der Kräfte von Elektrizitäten aufeinander, und damit auch der Kräfte von geladenen Leitern oder Nichtleitern aufeinander, wenn die Verteilung der freien Elektrizitäten (9) auf ihnen bekannt ist, ist Coulombs Gesetz unmittelbar brauchbar.

Von den nicht freien Elektrizitäten der Atome und Moleküle wirken nach dem Gesetz keine resultierenden Kräfte in die Ferne, da die vorhandenen Kräfte wegen der dicht benachbarten gleichen Mengen beider Elektrizitäten überall paarweise entgegengesetzt gleich sind.

Fraglich bleiben danach vor allem die Kräfte zwischen Elektrizitäten und unelektrischen Körpern, eben die Kräfte, durch welche die Elektrizitäten zuerst überhaupt sich gemeldet hatten (2). Doch auch diese Kräfte finden ihre vollständige Erklärung aus Coulombs Gesetz; es liegt hier nicht etwa eine besondere, neue Kraftart vor, wie das Folgende zeigt.

Es sei A (Abb. 67a und b) ein positiv geladener Körper, etwa eine geriebene Glasstange, und B ein in der Nähe befindlicher unelektrischer Körper. Wir sind schon darauf gekommen (9), daß in ihm gleichviel positive und negative Elektrizität vorhanden sein muß, und wir betrachten nun die Kraftwirkung der auf A befindlichen Elektrizität auf die Elektrizitäten (— +, Abb. 67a) eines der Raumelemente von B. Die beiden Kräfte k_1 und k_2, welche auf die beiden, in gleicher Menge im Raumelement enthaltenen Elektrizitäten wirken, sind beim gleichen Abstand von A nach Coulombs Gesetz einander entgegengesetzt gleich; sie streben die beiden Elektrizitäten des Raumelements voneinander zu trennen. Was danach erfolgt ist verschieden, je nachdem B Nichtleiter oder Leiter ist (17, 18).

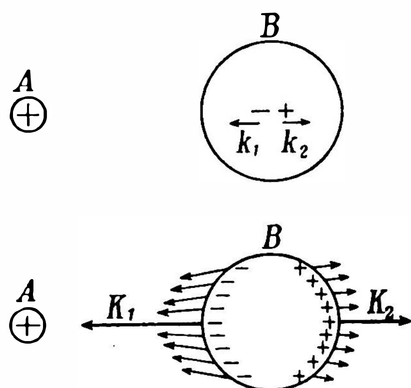


Abb. 67a (oben) und b (unten). Influenz.

17. Dielektrische Verschiebungen. — In einem vollkommenen Nichtleiter können die Elektrizitäten ihr Raumelement nicht verlassen. Es erfolgen nur kleine Verschiebungen der Elektrizitäten innerhalb der Raumelemente von B (Abb. 67a) in Richtung der Kräfte k_1, k_2. Man nennt dies die „dielektrischen

[1]) Es ist hier, wie sonst, ohne weiteres immer Ruhe zur Erdoberfläche gemeint (was auch Ruhe zum Äther der Erde bedeutet, vgl. O 4, 138).

Verschiebungen“ und den zugehörigen Zustand des Körpers „dielektrisch polarisiert“. Die Verschiebungen können auch unter Drehung der Atome oder Moleküle erfolgen, denen die Elektrizitäten angehören.

Es sind dies übrigens dieselben Verschiebungen der beweglichen Elektrizitäten in den Körpern, von denen in der Optik die Rede war, als hervorgebracht durch die elektrischen Kräfte des Lichtes (O 3, 85, 88, 92, 187); die Verschiebungen waren dort, entsprechend den Kräften, periodisch wechselnd.

Das Maß der in einem Körper erfolgenden dielektrischen Verschiebungen ist gegeben durch die „Dielektrizitätskonstante“ des Körpers (s. 113), die wir bei der allgemeineren Behandlung der Beteiligung der Isolatoren an den elektrischen Erscheinungen einführen werden (106).

18. Influenz. — Ist B Leiter, so sind in ihm die Elektrizitäten frei beweglich; sie folgen daher den Kräften k_1, k_2 solange bis sie an den Grenzen des Leiters einen Nichtleiter treffen, der keine weitere Bewegung gestattet. Es entsteht dadurch die in der Abb. 67b dargestellte Verteilung der Elektrizitäten auf B und der von A aus nach Coulombs Gesetz auf sie wirkenden Kräfte. Alle gegen A hin gerichteten Kräfte sind dabei größer als die von A weg gerichteten, und auch die Resultierende der ersteren, K_1, ist größer als die der letzteren, K_2, weil die angezogenen (negativen) Elektrizitäten nun A näher sind als die abgestoßenen (positiven). Es bleibt daher eine auf B wirkende, gegen A hin gerichtete Kraftdifferenz $K_1 - K_2$ als Resultierende übrig, und dies ist die somit aus Coulombs Gesetz erklärte Anziehungskraft des elektrischen Körpers A auf den unelektrisch herangebrachten B[1]).

Man nennt den eben betrachteten Vorgang, welcher den Leiter B vermöge der Nähe eines geladenen Körpers A in den in Abb. 67b dargestellten Zustand gebracht hat, „Influenz“. Die auf A befindliche Elektrizität hat auf B „influenzierend“ gewirkt; sie hat die abgebildete „Influenzverteilung“ der Elektrizitäten auf dem „influenzierten“ Körper B hervorgebracht.

Je größer die influenzierende Elektrizitätsmenge, desto stärker wird die Influenz, desto höher wächst die anziehende Kraft $K_1 - K_2$ an. Daß hierin keine Grenze beobachtet ist, dies zeigt, daß die in unelektrischen Leitern vorrätigen Elektrizitätsmengen beiderlei Zeichens sehr groß sein müssen.

19. Bei gegebener influenzierender Ladung ist die Stärke der Influenzverteilung dadurch begrenzt, daß die beiden influenzierten Elektrizitätsmengen auch ihrerseits Kräfte nach Coulombs Gesetz auf die im Inneren des Körpers B noch vorrätigen Elektrizitäten ausüben, welche den von A ausgehenden (in Abb. 67a dargestellten) Kräften entgegengesetzt gleich sind, so daß dann im Inneren des Leiters keine Kräfte resultieren und daher weiter auch keine Wanderung dieser Elektrizitäten und also keine Vermehrung der Influenzladungen mehr stattfindet. Man kann auch sagen: die Influenzverteilung in der Oberfläche des Leiters B „schützt“ sein Inneres vor den Kräften von A (vgl. 43).

Zu bemerken ist, daß die Abb. 67b nur als roh oder skizzenhaft gelten kann; sie berücksichtigt nicht die Kräfte, welche alle Teile der influenzierten Elektrizitäten

[1]) Es ist klar, daß auch auf einen nichtleitenden Körper B eine geringe Anziehungskraft resultieren muß vermöge der dielektrischen Verschiebungen, die einen kleinen Abstandsunterschied der beiden Elektrizitäten von A herstellen (vgl. 112).

auch untereinander nach Coulombs Gesetz ausüben müssen und welche ebenfalls mitbestimmend sind für ihre eigene Gesamtverteilung. Wir kommen später in verfeinerter Darstellung auf die Influenz zurück (81, Abb. 82).

20. Ladung durch Influenz. — Wird der influenzierte Körper B (Abb. 67b) an einer Stelle erdableitend berührt (6), so fließt die ganze mit der influenzierenden Elektrizität gleichnamige, von dieser abgestoßene Influenzladung (in der Abb. die positive) zur Erde ab, und es bleibt nur die entgegengesetzte, angezogene (negative) Influenzladung an B zurück. Diese Ladung ist von der influenzierenden auf A „gebunden" (8) und entweicht nicht. Entfernt man nun die Erdableitung, so bleibt diese Ladung an dem nunmehr wieder isolierten Leiter B gefangen auch dann, wenn zuletzt A mit der influenzierenden Ladung weggenommen wird. Die Influenzladung auf B ist nun frei geworden (9); dies ist die Art, einen Leiter durch Influenz aufzuladen.

Will man ein Elektroskop durch Influenz etwa von einer geriebenen Glasstange aufladen, so nähert man die Stange dem Elektroskop auf einige Dezimeter; dasselbe divergiert dann mit der der Stange gleichen, positiven Elektrizität. Berührt man nun bei ruhig gehaltener Stange das Elektroskop einen Augenblick ableitend mit dem Finger, so gehen seine Blätter zusammen; es scheint entladen zu sein. Entfernt man aber nun die Stange, so divergieren die Blätter wieder, jedoch diesmal mit der entgegengesetzten, negativen Elektrizität. Die Stange hatte hier die Rolle von A, das Elektroskop die von B in Abb. 67.

21. Trennung der influenzierten Elektrizitäten. — Ist der influenzierte Leiter (B) entzweiteilbar, etwa indem er aus zwei einander berührenden Kugeln besteht, jede an isolierender Handhabe, und trennt man die beiden Teile während sie noch in der Nähe der influenzierenden Ladung (A) sind, so kann man beide Influenzelektrizitäten getrennt erhalten. An der im Augenblick der Trennung nächst A gewesenen Kugel findet sich die A entgegengesetzte, an der ferner gewesenen die gleichnamige Ladung, beide sind von gleicher Menge; Neuberührung der beiden isoliert gehaltenen Kugeln in Abwesenheit von A entlädt sie beide.

Man sieht, daß Elektrizitätsgewinnung durch Influenz (20, 22, 24), ebenso wie die durch Reibung (10), nur auf Trennung schon vorhanden gewesener entgegengesetzter Elektrizitätsmengen beruht.

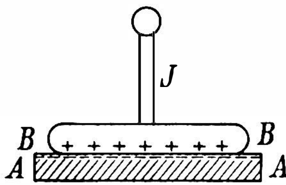


Abb. 68. Elektrophor.

22. Elektrophor. — Man bemerkt, daß Aufladungen durch Influenz mit einer gegebenen influenzierenden Ladung beliebig oft wiederholt werden können, ohne daß von dieser Ladung etwas verbraucht wird. Dies wird im Elektrophor benutzt (Abb. 68). Ein Harzkuchen AA ist durch Reiben negativ elektrisch gemacht; er kann dann den Metalldeckel BB influenzieren. Hat man den aufgesetzten Deckel einen Augenblick mit dem Finger berührt, um die abgestoßene Influenzladung zu beseitigen (20), so ist die in der Abbildung angedeutete Elektrizitätsverteilung vorhanden. Hebt man nun den Deckel an der isolierenden Handhabe J ab, so hat man seine positive Ladung zur Verfügung.

Dieser Vorgang: Aufsetzen des Deckels, Berühren mit dem Finger und Abheben mit stets wieder erneuter Ladung kann beliebig oft wiederholt werden,

und es kann die jedesmal gewonnene Ladung auf einen besonderen, isolierten Leiter übertragen und so auf ihm aufgehäuft werden.

Die Wirkung ist hier wegen der großen Nähe der influenzierenden Ladung an dem zu influenzierenden Körper, dem Deckel, besonders gut. Ein Verbrauch der Ladung des Harzkuchens ist trotz der Nähe nicht zu befürchten, weil der Deckel ihn nur an wenigen Punkten so gut berühren kann, daß dort stellenweise Entladung eintritt.

23. Energiegesetz gewahrt. — Daß so mit einer gegebenen kleinen Elektrizitätsmenge beliebig große Mengen frei erhalten und auf einen geeigneten Leiter gehäuft werden können, dies kann als Widerspruch zum Energiegesetz erscheinen; denn die aufgehäufte freie Elektrizitätsmenge kann bei ihrem Abfluß zur Erde Arbeitsleistungen vollbringen (vgl. 117), die wir später als elektrische Stromwirkungen noch im einzelnen betrachten werden. Der Widerspruch ist aber nur scheinbar: Es ist nicht zu übersehen, daß jede Abhebung des Elektrophordeckels eine besondere Arbeitsleistung (außer gegen die Schwerkraft, welche durch ein Gegengewicht auch unwirksam gemacht werden kann) erfordert, sobald er seine Ladung hat; denn die letztere ist stets der des Kuchens entgegengesetzt, so daß der Deckel notwendigerweise vom Kuchen angezogen wird. Influenzladungen können demnach überhaupt niemals ohne eine ihrer Menge entsprechende Arbeitsleistung frei gemacht, gewonnen werden.

Es gilt auch allgemein, daß Gewinnung freier Elektrizität immer nur unter Arbeitsleistung erfolgen kann, weil es in allen Fällen nur auf Trennung schon vorhanden gewesener entgegengesetzter Elektrizitätsmengen ankommt (10), die einander anziehen (vgl. auch 24).

24. Die Influenzmaschine arbeitet ununterbrochen in gleicher Weise wie der Elektrophor.

Das Wesentliche ist aus Abb. 69 zu ersehen. Influenzierend wirkt eine ursprünglich beigebrachte (oder durch kleine Reibungen in der Maschine selbst gelieferte) Ladung auf einer kleinen leitenden, isoliert befestigten Platte A_1 (Papier oder Metall). Influenziert wird die gebogene Metallstange $K_1 B_1$, die am einen Ende den Spitzenkamm K_1, am anderen Ende die Kugel B_1 trägt. Zwischen K_1 und A_1 befindet sich dabei die isolierende (Glas- oder Hartgummi-) Scheibe S S von Kreisform, die an der Achse x x drehbar ist. Der Spitzenkamm K_1 hat dabei die später (57) zu erklärende Wirkung, seine Elektrizität auf die Scheibe S zu übertragen, ohne dieselbe berühren zu müssen. Es wird somit bei positiver Ladung von A_1 die negative Elektrizität aus K_1 auf die Scheibe gehen, die positive aber an der Kugel B_1 sich sammeln können.

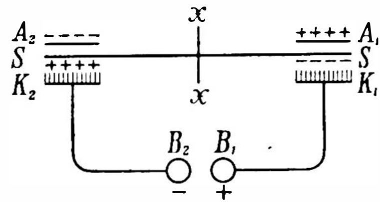


Abb. 69. Influenzmaschine.

Rotiert die Scheibe an ihrer Achse x x, so nimmt sie die auf sie übergegangene negative Elektrizität mit sich fort und der Influenzvorgang wiederholt sich mit entsprechender Steigerung der Ladung von B_1. Zu verhindern ist nur, daß die Scheibe bei ihrer Drehung mit negativer Ladung zu A_1 zurückkehrt. Dazu dient die diametral entgegengesetzt angebrachte Verdoppelung der Einrichtung, $A_2 K_2 B_2$. A_2 nimmt der Scheibe (mittels besonderer Spitze oder auch Schleif-

einrichtung) negative Ladung ab, noch bevor diese zum Kamme K_2 gelangt, und K_2 läßt sogar, influenziert durch die negative Ladung von A_2, einen Überschuß von positiver Elektrizität auf die Scheibe ausströmen, während negative an B_2 geht. Die Scheibe kommt daher bei A_1 und K_1 sogar positiv geladen an. Dies unterstützt die weitere Wirkung, nämlich fortgesetzte Influenzierung von K_1 B_1, und es folgt somit ununterbrochene Wiederholung der Influenzvorgänge an beiden Seiten in dem Maße, in welchem die Elektrizitäten an B_1 und B_2 verbraucht werden, solange die Maschine in Drehung ist.

Man erhält hier an den Kugeln K_1 K_2 beide Elektrizitäten in gleicher Menge zur Verfügung. Wünscht man nur Ladung eines Zeichens, so leitet man die andere dauernd zur Erde.

Gute Influenzmaschinen, denen noch allerlei die Wirkung sicherndes, grundsätzlich übrigens nicht wichtiges Nebenwerk hinzugefügt sein kann, sind weit ergiebiger als die Reibelektrisiermaschinen; man kommt hier schon zu $^1/_{100}$ Coulomb (15) in der Minute oder auch mehr.

Auch hier erfolgt die Elektrizitätslieferung nicht ohne entsprechende Arbeitsleistung (23); denn es ist jeder Teil der Scheibe bei der Drehung stets entgegengesetzt geladen dem Kamme, von dem er sich entfernt, und gleichnamig geladen mit dem Kamme, dem er sich nähert. Es muß also gegen die elektrischen Anziehungen und Abstoßungen gearbeitet werden, sobald die Maschine überhaupt Elektrizität liefert.

Ebenso ist es übrigens auch bei der Reibelektrisiermaschine, die auch nur bei einer über die Reibungsarbeit hinausgehenden Arbeit gegen die elektrischen Kräfte Ladungen liefern oder aufhäufen kann.

Influenzmaschinen, die statt der rotierenden Scheiben ein laufendes Band benutzen („Bandgeneratoren"), dienen neuerdings zur Hervorbringung höchster elektrischer Spannungen.

Elektrische Spannung.

25. Spannungszustand. — Lädt man auf einen isolierten Leiter eine steigende Menge von Elektrizität des einen oder auch des anderen Zeichens, etwa indem man ihn durch einen Metalldraht mit einer in Gang befindlichen Influenzmaschine verbindet, so entsteht in der Umgebung des Leiters und an ihm in steigendem Maße ein Zustand, der mit dem Namen elektrischer „Spannung" bezeichnet wird[1]).

Der Spannungszustand ist wieder nur Folge der Kräfte nach Coulombs Gesetz, welche die auf dem Leiter befindlichen freien Elektrizitäten aufeinander ausüben. Sie stoßen einander alle ab und streben daher auf größeren Raum auseinander, weg von dem Leiter. Man kann Spannung definieren als das Streben der Elektrizität, den Leiter zu verlassen.

26. Elektroskope und Funken als Spannungsanzeiger. — Unmittelbar wahrnehmbar ist der Spannungszustand nicht. Hat aber der geladene Leiter bewegliche Teile, so bemerkt man, daß sie auseinanderstreben, wie es an dem Papierbusch, einem Bündel von Papierstreifen an dem Stab, oben in Abb. 73 (41) zu sehen ist. Dies ist eines der Zeichen vorhandener und zwar ziemlich hoher elektrischer Spannung. Die auseinanderstrebende Elektrizität nimmt hier die beweglichen Teile mit.

---

[1]) Statt „Spannung" wird manchmal der Name „Potential" gebraucht, welchem man aber besser die Bedeutung einer rein mathematischen Hilfsgröße beläßt.

So ist auch das Auseinanderstreben der Blätter der Elektroskope (6) Spannungszeichen. Jedes Elektroskop kann daher als Meßinstrument für Spannung dienen, und der eben betrachtete Papierbusch ist ein gut brauchbarer grober Spannungszeiger.

Ein anderes Symptom von Spannung zeigt sich, wenn man dem betreffenden Leiter einen anderen nähert, der die Spannung nicht hat: es springt dann ein Funke zwischen den beiden Leitern über. Funken sind charakteristische Spannungserscheinung. Hier bahnt sich die vom Leiter fortstrebende Elektrizität selbst einen leitenden Weg durch die isolierende Luft (513).

27. Eigenschaften des elektrischen Funkens. — Hat einmal ein Funke von einem geladenen Leiter zur Erde geschlagen, so ist der Leiter entladen, wenn er nicht etwa andauernde Nachlieferung von Elektrizität hat. Es ist wie wenn er mit einem erdverbundenen Metalldraht kurze Zeit berührt worden wäre[1]). Der Funke ist leuchtende und leitende Luft; er ist darin ähnlich einer Flamme (4). Die Dauer des Leuchtens und Leitens ist aber sehr kurz; sie zählt meist nur nach Milliontel Sekunden, wie die Beobachtung mit einem gedrehten Spiegel zeigt, der außerordentlich schnell um seine Achse laufen muß, wenn das Spiegelbild eines Funkens eine die Dauer-Messung ermöglichende Verbreiterung zeigen soll.

Der Funke zeigt auch Wärmewirkung, jedoch ist sie, entsprechend dem geringen Volum der beteiligten Luft und ihrer geringen spezifischen Wärme, auch bei gut sichtbarem Leuchten des Funkens nur gering. Körper von einigem Wasserwert werden durch Funken nicht merklich erhitzt; Sprengstoffe festen Aggregatzustandes werden — wenn sie nicht besonders empfindlicher Art sind — durch Funken nicht leicht entzündet; ist aber das Gas, durch welches der Funke schlägt, selbst explosibel, wie z. B. Ätherdampf, Leuchtgas oder Wasserstoff in Mischung mit Luft, so sind schon kleinste Fünkchen gefährlich, sobald große Gasmengen vorrätig sind, auf die die Explosion übergreifen kann. Die Wärmewirkungen steigen übrigens mit der im Funken entladenen Elektrizitätsmenge (vgl. 118 u. f.).

Zieht man mit der Hand einen Funken aus einem geladenen Leiter, so verspürt man eine Muskelzuckung; sie ist Folge der durch Nerven und Muskeln gehenden Elektrizitätsbewegung (vgl. 401) und zeigt sich auch bei abgestorbenen tierischen Präparaten, wenn sie nicht zu alt sind. Ruhende Ladung, die man einem Lebewesen auf dem Isolierschemel erteilen kann, bringt solche Wirkung nicht hervor.

Daß der Blitz ein elektrischer Funke großen Maßstabes ist und somit Gewitter elektrische Erscheinungen sind, dies wurde von der Zeit an erkennbar, da Leibniz zum erstenmal mit der ihm von Guericke geschenkten Elektrisiermaschine (2) Fünkchen beobachtete.

28. Spannung an Leitern. — Jeder einheitliche Leiter hat bei ruhender Elektrizität einheitliche Spannung an allen seinen Punkten; er hat überhaupt nur einerlei Spannung. Denn würde die Elektrizität von einem Punkte des Leiters mehr weggetrieben werden als von einem anderen,

[1]) Rückständige Ladung kann sich in beiden Entladungsfällen aus zwei Gründen zeigen: 1. weil Entladungen mehr oder weniger schwingend sind (395 u. f.), 2. weil die Isolatoren der Leiter Rückstandsbildung zeigen können (114).

so würde sie von dem einen Punkt zu dem anderen, vom Ort höherer Spannung zum Ort niedrigerer Spannung, sich bewegen, was der Leiter gestattet; sie würde dann aber nicht in Ruhe sein. Ist sie zur Ruhe gekommen, so müssen also alle Punkte des Leiters gleiche Spannung haben, wie behauptet. Wir bringen später noch einen auffallenden Beispielsfall hierfür (42).

Es ist daher gleichgültig, welche Stelle des Leiters etwa durch einen Draht mit einem Elektroskop als Spannungsmesser verbunden wird; man erhält überall die gleiche Divergenz am Elektroskop, wenn nur die Elektrizität am Leiter in Ruhe ist.

Will man zwei Leiter auf gleiche Spannung bringen, so verbindet man sie durch einen Metalldraht.

Nichtleiter können an verschiedenen Punkten sehr verschiedene Spannung haben.

29. Analogie mit Gasdruck. — Elektrische Spannung, wenigstens an Leitern, hat viel Ähnlichkeit mit Gasdruck. Auch der Druck eines Gases auf Gefäßwände ist durch ein Auseinanderstreben — wenn auch hier anderer Ursache — bedingt; auch er ist ohne weiteres nicht merklich, äußert sich aber wenn bewegliche Teile der Wände da sind, wodurch er auch meßbar wird — Federmanometer und Elektroskop kommen so in Analogie —, oder wenn er Hindernisse durchbricht wie die Elektrizität im Funken. Und wie bei ruhendem Gas im ganzen Gefäß überall derselbe Druck ist (von der Schwere des Gases abgesehen), so ist auch — wie gezeigt (28) — in und an dem ganzen Leiter überall dieselbe elektrische Spannung. Und wie die Gaspumpe unter Arbeitsaufwendung steigende Gasmengen in ein Gefäß bringt und dadurch steigenden Druck schafft, so wirkt — wie wir sahen — die Elektrisiermaschine auf die Elektrizitätsmengen mit dem Ergebnis steigender Spannung des in Aufladung befindlichen Leiters.

Die hier vorhandenen Ähnlichkeiten haben viel Wert, um den neuartigen Begriff der elektrischen Spannung im Anschluß an den geläufigen Begriff des Gasdrucks zu erfassen.

Man kann auch unmittelbar Schlüsse ziehen von Erscheinungen des Gasdrucks auf Erscheinungen der elektrischen Spannung, sofern man sicher ist, daß in beiden Fällen die gleichen quantitativen Gesetze gelten. Wir werden im Späteren immer wieder auf die Analogie von Spannung mit Druck zurückkommen (32, 49), wobei sich auch deren Grenzen zeigen werden (99).

30. Maß der Spannung. — In bestimmter Einheit meßbar wird Spannung durch die Arbeit, welche, vermöge des Strebens der Elektrizität, von dem betreffenden Körper wegzugehen, von einer beweglich gemachten Einheitsmenge seiner Ladung geleistet wird, wenn dieselbe, dem Streben folgend, den Körper verläßt und nach einem Ort minderer Spannung geht. Oder auch, was dasselbe ist, durch die Arbeit, welche geleistet werden muß, um entgegen den abstoßenden Kräften noch eine Einheitsmenge gleichnamiger Elektrizität mehr von dem gedachten anderen Ort auf den Körper zu bringen. Die beiden Arbeitsleistungen sind gleich; denn es kommen auf gleichen Wegen in den beiden Fällen gleiche Kräfte vor.

Die dabei benutzt zu denkende Einheitsmenge muß genügend klein sein, damit ihre Wegnahme oder Zugabe die Spannung nicht wesentlich ändere.

Man kann daher besser sagen: Die Arbeit an sehr kleiner Elektrizitätsmenge ins Verhältnis zu dieser Menge gesetzt, der sie proportional ist, bemesse die Spannung[1]).

31. Nur Spannungsunterschiede sind wahrnehmbar. — Ohne Angabe eines bestimmten anderen Ortes, mit welchem der spannungsbemessende Elektrizitätsaustausch stattfinden soll (30), ergäbe die erläuterte Bemessungsweise nichts Bestimmtes. Dies entspricht aber auch ganz allen Spannungserscheinungen, die immer zwischen zwei Punkten oder zwei Leitern auftreten. Vor allem der Funke zeigt dies am einfachsten; er hat Anfang und Ende, springt immer zwischen zwei Punkten über. Seine erreichbare Länge gibt ein Maß für die Spannung, welche die beiden Punkte oder Leiter gegeneinander haben, für das Streben der Elektrizität vom einen zum anderen zu gehen, oder — was dasselbe ist — für den Spannungsunterschied der beiden Leiter, für den Unterschied im Streben des Weggehens der Elektrizität bei den beiden Leitern. Wo keine Spannungsunterschiede sind, gibt es auch keine Spannungserscheinungen (vgl. 99). Zwei gleichnamig geladene Leiter, die man vorher durch metallische Verbindung auf gleiche Spannung gebracht hat (28), geben keine Funken gegeneinander, wohl aber kann jeder von ihnen starke Funken gegen Erde geben. Sie haben Spannung gegen Erde, aber nicht gegeneinander.

Wird einmal von Spannung schlechthin gesprochen, so meint man damit Spannung gegen Erde[2]).

32. Wichtig ist die Feststellung, daß die Wahl des Weges, auf welchem der spannungsbemessende Elektrizitätstransport (30) zu denken ist, für die Größe der Arbeit gleichgültig ist, wenn nur Anfangs- und Endpunkt des Weges feststehen. Denn wenn die Arbeit auf einem Wege größer wäre als auf einem zweiten, so könnte man die Elektrizität auf dem zweiten Wege hinbringen, auf dem ersten aber zurückgehen lassen, was Arbeitsgewinn ohne irgendwelche Änderung des Ganzen und somit ein Perpetuum mobile gäbe. Dies ist aber nach aller schon im Energiegesetz zusammengefaßten Erfahrung unmöglich.

Die Spannungsbemessung durch die Arbeit ist also eindeutig bei Angabe der beiden Punkte, zwischen welchen die Spannung gelten soll, ohne Festsetzung irgendeines bestimmten Weges.

Man kann durch eine ähnliche Überlegung, auf Grund der Gültigkeit des Energiegesetzes, auch leicht nachweisen, daß zwei Punkte oder Leiter, die gegen einen dritten (z. B. gegen Erde) die Spannungen A bzw. B haben, gegen einander die Spannung A—B haben.

Spannung kann positiv oder negativ sein. Die Spannung eines Leiters oder Punktes gegen einen anderen ist positiv, wenn sie positive Elektrizität von dem ersteren weg zu dem anderen hin treibt. Sind zwei Punkte oder Leiter auf gleiche Spannung gegen Erde, aber entgegengesetzt geladen, so daß der eine die Spannung +A, der andere —A hat, so haben sie nach Vorigem gegeneinander die Spannung 2A.

Alles dies hat seine Analogie beim Gasdruck (vgl. 29). Auch da ist die Arbeit zur Herstellung eines bestimmten Druckes unabhängig von dem Weg, auf welchem das Gas von dem Vorratsbehälter in das Druckgefäß gepumpt wird, wohl aber abhängig von dem Anfangsdruck des Gases im Vorratsbehälter. Auch gelten gleiche Sätze für den Zusammenhang der Druckunterschiede in drei Gasräumen.

---

[1]) Man sehe hierzu die Bemerkungen der Fußnoten zur Festlegung von elektrischer Kraft (65), die hier ebenfalls in Betracht kommen.

[2]) Manchmal — bei Spannungsberechnungen, die den betreffenden Leiter als allein in der Welt vorhanden annehmen, — ist auch Spannung gegen einen unendlich fernen Punkt gemeint, meist ohne daß das gesagt ist. Es ist immer verfehlt, mit Spannung an sich, ohne Angabe des Bezugsortes, in unbestimmter Weise zu rechnen.

Die Spannung eines Leiters gegen einen bestimmten Punkt seiner Umgebung ist proportional der Elektrizitätsmenge auf dem Leiter, solange seine Umgebung unverändert bleibt. Es folgt dies aus der festgesetzten Bemessungsweise der Spannung (30); denn die Kräfte in der Umgebung des Leiters sind nach Coulombs Gesetz proportional der Menge auf dem Leiter, und die Abstände und Wege, die zusammen mit den Kräften die Arbeit bestimmen, bleiben bei unveränderter Umgebung unverändert.

33. Spannungseinheit. — Eine Einheit der Spannung kann auf Grund der festgesetzten Bemessungsweise (30) gewählt werden; es wäre das diejenige Spannung, welche an der Mengeneinheit die Arbeitseinheit leistet. Diese Spannungseinheit gehört ins elektrostatische Einheitssystem (264), wie die aus Coulombs Gesetz abgeleitete Mengeneinheit (15). Sie wird bei Rechnungen über ruhende Elektrizität gebraucht.

Allgemeingebräuchliche Spannungseinheit ist dagegen das „Volt"; es gehört, wie die Mengeneinheit Coulomb (15), ins absolute elektromagnetische Einheitssystem (264 u. f., Tab. 50) und ist Volta zu Ehren so benannt.

Das Volt ist eine sehr kleine Spannungseinheit. Zur Orientierung kann festgehalten werden, daß Fünkchen von 1 mm Länge erst bei rund 4000 Volt Spannung zwischen zwei Leitern auftreten. Gute Influenzmaschinen, die leicht Funken von Dezimeterlänge liefern, erzeugen Spannungen bis gegen 1 Million Volt. Es ist 1 Volt = $\frac{1}{300}$ elektrostratische (CGS-) Spannungseinheit.

34. Spannungsmessung. — Unmittelbar nach der festgesetzten Bemessungsweise (30) werden Spannungen durch Kraftmessung an einem beweglich gemachten Teile des betreffenden Leiters ermittelt. Zu möglichst einfachem Übergang von der Kraft zur Arbeit wählt man eine Leiterform, bei der die Kraft längs des ganzen Weges bis zum anderen Leiter, der Erdspannung hat, konstant ist; es ist dies im Plattenkondensator verwirklicht, auf den wir später eingehen (100). So kann man beliebig hohe Spannungen messen. Da aber solche Messungen nicht ganz einfach mit Genauigkeit durchführbar sind, ist es wichtig, daß mit ihrer Hilfe Funkenstrecken (26) geeicht worden sind, so daß man die sehr einfache Messung von Funkenlängen — „Schlagweiten" — zur Spannungsermittelung zur Verfügung hat. Die Schlagweiten sind in geringem Maße von der Größe der Kugeln abhängig, zwischen welchen der Funke überspringen soll, und sie sind nicht genau proportional der Spannung; man hat hierfür Tabellen. Beispielsweise kann man für Schlagweiten von einigen Millimetern zwischen nicht zu kleinen Kugeln 4000 Volt Spannung für je 1 mm Funkenlänge rechnen, wie bereits angegeben. Bei größeren Schlagweiten sind die Spannungen verhältnismäßig geringer; 5 cm Schlagweite bei Kugeln von 5 cm Durchmesser entspricht rund 100000 Volt. Zur Ausführung der Messung wird die eine Kugel leitend mit Erde, die andere mit dem Leiter verbunden, dessen Spannung gegen Erde gemessen werden soll, und die Kugeln werden langsam so lange einander genähert, bis der Funke überspringt.

35. Mit den Funken können dann weiter auch Elektroskope (26) in Volt geeicht werden, sobald sie eine Skale, mit übrigens willkürlicher Einteilung, zur Ablesung der Divergenzen haben; sie sind dann „Elektrometer", mit welchem Namen man ganz allgemein elektrostatische, d. i. mit ruhender Elektrizität arbeitende Spannungsmesser bezeichnet.

Notwendig ist dabei eine gut gesicherte Erdverbindung der Hülle des Elektroskops; denn die Divergenzen messen Spannung der Blätter gegen deren Umgebung (vgl. 31), und man wünscht

gewöhnlich Spannung gegen Erde zu messen. Ist die Umgebung der Blätter, die Hülle, unbestimmt in Form oder Spannung, so ist auch die Bedeutung der Divergenzen unbestimmt. Die Glashülle des in Abb. 63 dargestellten Elektroskops leitet für gewöhnlich gut genug, um auf dem Tische stehend als erdabgeleitete Hülle zu wirken. Zu größerer Sicherheit belegt man die Glashülle innen mit Staniolstreifen, die nach außen Erdableitung haben, oder man macht die Hülle ganz aus Metall und versieht sie nur mit einer Öffnung zur Ablesung.

Man kann solche Elektroskopvorrichtungen mit schwereren beweglichen Teilen für Spannungen bis 10000 Volt oder mehr machen; das Elektroskop Abb. 63 in nicht zu kleiner Ausführung kann im Bereich um 1000 Volt dienen, und kleinste Ausführungen mit ganz leichten Aluminiumblättern oder leitend gemachten Quarzfäden messen gut um 100 Volt.

36. Für noch kleinere Spannungen sind diese „*idiostatischen*" Elektrometer zu unempfindlich; man benutzt da die „*heterostatischen*", die eine *fremde Spannungsquelle zu Hilfe nehmen*. Die einfachste, ursprüngliche Form zeigt Abb. 70. Die beiden vertikalen, einander parallel gegenüberstehenden Metallplatten p haben von einer passenden Spannungsquelle (z. B. einer Trockensäule, 144), deren Mitte Erdableitung hat, dauernd entgegengesetzt gleiche Ladungen, und dazwischen hängt das leichte Metallblatt oder der metallüberzogene Quarzfaden b b, dem man die zu messende Spannung mitteilt. Hat der Faden b b Erdleitung, also Spannung Null gegen Erde, so hängt er vertikal herunter; mit positiver Spannung (wie gezeichnet) geht er nach rechts, mit negativer nach links, und die Ausschläge, die mit einem Mikroskop abgelesen werden können, sind nahe proportional der Spannung. So kann man bis zu einigen Volt herab messen.

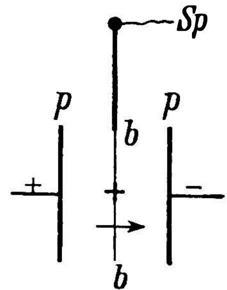


Abb. 70. Einfaches heterostatisches Elektrometer.

Für kleinste Spannungen, Zehntel und Hundertel Volt, ist das „*Quadrantelektrometer*" (W. Thomson 1867) mit allerlei Varianten das Hauptinstrument. Abb. 71 zeigt die wesentlichen Teile von oben gesehen. Hier ist die Hilfsspannung (etwa 100 Volt, in der Abbildung positiv angenommen) an dem beweglichen Teil n n, einer lemniskatenförmigen, sehr leichten Metallplatte (in der Abbildung gestrichelt), die in ihrem Mittelpunkt an dünnem Faden — drehbar um ihn als vertikaler Achse — aufgehängt ist. Dieser Teil n n befindet sich im Inneren einer zylindrischen, flachen Büchse, die in vier voneinander isoliert aufgestellte Quadranten geteilt ist. Je zwei einander diametral gegenüberstehende Quadranten sind leitend miteinander verbunden, und das eine Paar erhält Erdspannung, das andere die zu messende Spannung (in der Abbildung positiv angenommen). Es lädt sich dann das erdverbundene Quadrantenpaar von selber durch Influenz entgegengesetzt (negativ) auf, und man sieht, daß alle elektrischen Kräfte im Inneren der Büchse zusammen ein Drehmoment auf n n in der Pfeilrichtung ergeben, welches einen mit Spiegelablesung zu beobachtenden Ausschlag bewirkt, der die Spannung mißt.

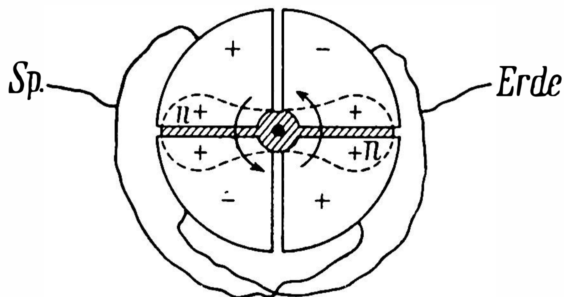


Abb. 71. Quadrant-Elektrometer.

37. Die *Eichung solcher empfindlicher Elektrometer in Volt* erfolgt

mittels Normalelementen (210), die gesichert bekannte kleine Spannungen (1 bis 2 Volt) stets vorrätig bieten.

Solche kleine Spannungen, und auch größere, werden übrigens, wenn sie durch die später zu behandelnden reichen Quellen von Elektrizität geliefert werden und also durch Beanspruchung auf Elektrizitätsabgabe nicht gestört werden, am besten elektrodynamisch, d. i. mittels Wirkungen der elektrischen Ströme, die sie geben können, gemessen. Die zugehörigen elektrodynamischen Spannungsmesser, auch Voltmeter genannt, behandeln wir später (165).

Verteilung der freien Elektrizität auf Leitern.

38. Sie sitzt in Ruhe nur an der Oberfläche. — Wir stellen uns einen beliebig geformten Leiter vor, etwa einen Metallkörper, der elektrisch geladen sei. Wir nehmen zunächst eine beliebige Verteilung der Ladung über sein Volum an und fragen: ob dies die endgültige Verteilung sei, bei welcher die Elektrizität auf dem Leiter in Ruhe bleibt trotz der Kräfte, welche alle ihre einzelnen Elementarquanten nach Coulombs Gesetz aufeinander ausüben und trotz deren freier Beweglichkeit im Leiter. Jedenfalls wird wegen dieser Beweglichkeit Ruhe nur sein, wenn die Gesamtresultierende aller Kräfte auf jedes einzelne Elementarquant der vorhandenen Elektrizität Null ist.

Es seien zunächst die Elementarquanten im Inneren des Leiters betrachtet; die Oberfläche untersuchen wir später (51 u. f.). Es wirken ebenso viele Kräfte nach Coulombs Gesetz auf jedes dieser Elementarquanten, als freie Elementarquanten am ganzen Leiter sind; die Kräfte der zum ungeladenen Leiter gehörigen Elementarquanten fallen weg, weil sie paarweise entgegengesetzt gleich sind.

Man sieht, daß zur Beantwortung der Frage nach der Ruheverteilung der Elektrizität eine Rechenaufgabe übrigbleibt: Wie muß ein Etwas, das Kräfte nach Coulombs Gesetz ausübt, räumlich verteilt sein, damit die Resultierende aller auf einen irgendwo im Inneren des gegebenen Raumes befindlichen Teil dieses Etwas wirkenden Kräfte Null sei? Die schon bei den nach Newtons gleichem Gesetz wirkenden Kräften der Gravitation erwähnte Rechenweise („Potentialtheorie", M 210) leistet das Verlangte. Sie ergibt: Das Etwas muß ganz an die äußersten Grenzen des Raumes sich begeben haben. Die freie Elektrizität des Leiters muß also ganz an dessen Oberfläche sich begeben haben, dann ist — bei geeigneter Verteilung an der Oberfläche — auf keine Elektrizität im Inneren mehr eine Kraft wirksam, auch auf die zum ungeladenen Leiter gehörigen Elektrizitäten nicht, und somit wird dann im ganzen Inneren Ruhe sein.

39. Für einen kugelförmigen Leiter ist dieses Ergebnis leicht ohne viel Rechnung einzusehen. Wir zeigen, daß in der Tat im ganzen Inneren der Kugel keine Kraft wirkt, wenn ihre freie Elektrizität nur an der Oberfläche sitzt. Die Vereinfachung für die Kugel ergibt sich dadurch, daß wegen deren allseitiger Symmetrie von vornherein gleichförmige Verteilung der Elektrizität an der Oberfläche anzunehmen ist, so daß die an irgendeinem Oberflächenstück befindliche Elektrizitätsmenge der Flächengröße des Stückes proportional ist. Es ist dann leicht einzusehen, wenn man eine beliebige Elektrizitätsmenge E (Abb. 72) irgendwo im Inneren der Kugel betrachtet, daß je zwei einander gegenüberliegende, durch eine Doppelpyramide mit der Spitze in E begrenzte Oberflächenteile, wie o_1 und o_2 oder p_1 und p_2, Kräfte auf E ausüben,

die einander entgegengesetzt gleich sind und also die Resultierende Null geben. Es verhalten sich nämlich diese Oberflächenteile als Pyramidenquerschnitte wie die Quadrate ihrer Abstände von der Pyramidenspitze E. Bei o_1 und o_2 ist dies unmittelbar klar, weil die beliebig schmal zu denkende Pyramide von der Kugeloberfläche senkrecht durchschnitten wird; bei p_1 und p_2 gilt es aber ebenfalls, weil die hier schiefen Schnitte unter gleichen Winkeln schief sind, was aus der Gleichheit der angezeichneten Winkel leicht sich ergibt. Wie die Oberflächenteile verhalten sich aber auch die darauf befindlichen Elektrizitätsmengen, und wenn diese dem Entfernungsquadrat von E proportional sind, so sind ihre Kräfte auf E nach Coulombs Gesetz einander gleich, was zu zeigen war und was nachweist, daß die Gesamtresultierende aller Kräfte der Kugelladung auf jede Elektrizitätsmenge im Inneren der Kugel Null ist.

40. Besonderer Nachweis von Coulombs Gesetz. — Man bemerkt, daß das Ergebnis der nur an der Oberfläche sitzenden Ladung ganz an die Gültigkeit des Entfernungsquadratgesetzes gebunden ist. Würden die elektrischen Kräfte bei wachsendem Abstand schneller abnehmen als nach der 2ten Potenz des Abstandes, etwa nach der 2·1ten Potenz, so würden die von E entfernteren Oberflächenteile o_2, p_2 (Abb. 72) schwächere abstoßende Kräfte auf gleichnamige Elektrizität bei E ausüben als die näheren, und dieselbe würde demnach in das Innere getrieben werden, solange bis die dortige Anhäufung gleichgewichthaltende Gegenkräfte entwickelt hat; es würde also im Ruhezustande nicht nur an der Oberfläche, sondern auch im Inneren freie Ladung sich finden müssen. Aber auch im anderen Falle, wenn die Kräfte langsamer abnähmen als nach Coulombs Gesetz, etwa nach der 1·9ten Potenz des Abstandes, würde innen Ladung sich sammeln, nur wäre sie der Oberflächenladung im Zeichen entgegengesetzt, weil jetzt bei bloßer Oberflächenladung Kräfte übrig blieben, die gleichnamige Elektrizität aus dem Inneren nach außen treiben würden, so daß innen die entgegengesetzte frei übrigbliebe.

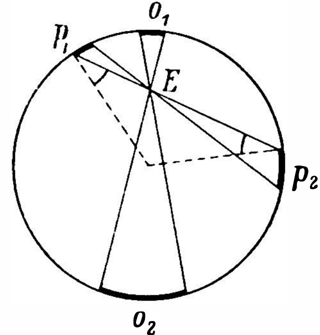


Abb. 72. Entfernungsquadrat-Kräfte im Innern der gleichmäßig belegten Hohlkugel Null.

Man sieht, daß der Nachweis vollkommenen Fehlens freier Ladung im Inneren einer geladenen Kugel einen besonders einfachen und auch feinen Nachweis genauer Gültigkeit von Coulombs Gesetz gibt. Dieser Nachweis ist erbracht worden. Eine dünnwandige, isoliert aufgestellte Hohlkugel aus Metall umschließt konzentrisch eine etwas kleinere Metallkugel. Diese innere Kugel ist von der äußeren durch isolierende Stützen getrennt; es kann aber (durch eine kleine Öffnung der äußeren Kugel) auch leitende Verbindung der beiden Kugeln hergestellt werden. Lädt man während solcher Verbindung beide Kugeln auf, trennt sie dann, entlädt die äußere und prüft den elektrischen Zustand der inneren, etwa mit dem Quadrantelektrometer, so findet man nicht die geringste sicher nachweisbare Spannung und also auch Ladung an ihr. Es ist also alle den Kugeln zugeführte Ladung nur auf die äußere Kugel gegangen, wie es der genau 2ten Potenz in Coulombs Gesetz entspricht.

41. Im Inneren eines hohlen, geladenen Leiters wirken keine Kräfte. — Ein Versuch, der in etwas gröberer Weise zeigt, daß ein Leiter, dessen Ladung überhaupt nur an der Oberfläche sitzen kann, weil er hohl ist, in seinem Inneren gar keine Zeichen von elektrischen Kräften gibt, wie es dem Vorhergehenden entspricht (38), ist der folgende.

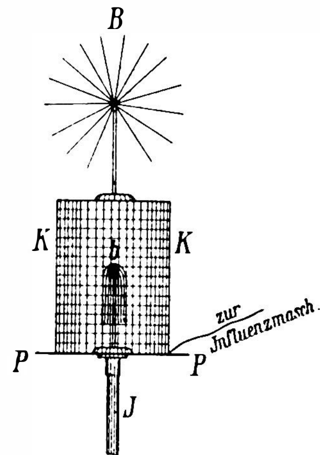


Abb. 73. Elektrostatischer Schutz.

Auf der Metallplatte P P (Abb. 73) mit isolierender Stütze J steht der Papierbusch b, ein Bündel von Seidenpapierstreifen an einer Metallstange, auf eben-

falls genügend leitendem Holzfuß. Lädt man das ganze (noch ohne den Drahtkäfig KK) durch Verbindung mit einer Influenzmaschine, so sträuben sich die Papierstreifen des Busches b (wie bei B in der Abbildung), der als Spannungszeiger wirkt (26), zum Zeichen starker Ladung.

Stülpt man jetzt den Drahtkäfig K K darüber, so hört trotz dauernd weiter ladender Influenzmaschine jedes Spannungszeichen an b auf; wohl aber zeigt ein oben auf den Käfig gestellter Papierbusch B starke Spannung des Ganzen an. Die am Drahtkäfig sitzende Ladung, welche diese Spannung verursacht, übt aber keine Kräfte auf das Innere aus, wie die Ruhe des inneren Papierbusches zeigt.

42. Die vom äußeren Papierbusch B angezeigte Spannung ist gegen Erde, da die genügend leitend mit der ganzen Erde verbundenen Zimmerwände die Umgebung oder Hülle von B bilden (vgl. 35). Die Spannung Null, welche b anzeigt, ist gegen den Käfig K, der die Hülle von b bildet. Es ist also, während das Ganze starke Spannung gegen Erde hat, im Hohlraum keine Spannung der einzelnen Teile gegeneinander vorhanden; das ganze Innere des Leiters hat einerlei Spannung. Es ist dies nur ein besonderer Erläuterungsfall für die allgemein schon erlangte Einsicht (28), daß ein mit ruhender Elektrizität geladener Leiter in allen seinen Teilen P, b, K, B gleiche Spannung hat (vgl. ebenso 99).

43. Elektrostatischer Schutz. — Nähert man dem Käfig (KK, Abb. 73) einen mit der Erde verbundenen Leiter, etwa die Hand, so kann man Funken daraus ziehen — wieder ein Spannungszeichen des Ganzen —; das Innere des Käfigs bleibt aber davon unberührt. Man kann auch sagen: der Käfig „schützt sein Inneres“ vor den außen vorhandenen elektrischen Kräften. Es ist das derselbe „elektrostatische Schutz“, den wir auch bei der Influenzwirkung schon bemerkten (19), und man sieht, daß ganz allgemein eine leitende Hülle ihr Inneres vor elektrischen Kräften schützt, gleichgültig ob diese Kräfte von fern — durch Influenz — oder, wie hier, längs eines leitenden Weges von der Influenzmaschine her wirken.

44. Blitzschutz. — Der elektrostatische Schutz beruht ganz auf der Verteilung der Elektrizitäten an der äußeren Oberfläche der Hülle (vgl. 19); ist diese Verteilung, welche zum Ruhezustand gehört, bei schneller Änderung der äußeren Kräfte noch nicht eingetreten, so kann auch der Schutz noch nicht vollkommen sein. Man sieht daraus, daß die Wände einer Hülle, die schützen soll, um so besser elektrisch leiten müssen, je schneller etwaige Änderungen der äußeren Kräfte sind. Bei Gewittern kommen sehr schnelle und große Änderungen der elektrischen Kräfte der Wolken vor; die Wände der Häuser leiten nicht gut genug, um unter diesen Umständen das Innere vor Blitzgefahr zu schützen; ein Haus aus Eisenblech würde genügend schützen. Wie das Beispiel des Käfigs im Versuche Abb. 73 zeigt, genügt aber auch ein mit dem Erdboden gut verbundenes, die äußersten Teile des Hauses umgebendes metallisches Gestänge, wie es gute Blitzableiter bieten, trotz der nichtleitenden Zwischenräume, zum Schutze wenigstens des tieferen Inneren. Auf die Spitzen der Blitzableiter, die nicht so wesentlich sind, kommen wir noch zurück (57).

Zum Schutze vor langsam sich ändernden oder dauernd gleichbleibenden elektrischen Kräften der Atmosphäre leiten die Steinwände der Häuser gut genug; man kann von solchen Kräften im Inneren der Häuser nichts erfahren. In der Tat trägt die Erdoberfläche fast dauernd ganz erhebliche freie elektrische

Ladung und zwar negative; auch ganz ohne Anwesenheit von Wolken („Schönwetterelektrizität", 97), wovon man aber im Inneren der Häuser nichts merken kann.

45. Man kann nach der Dicke der Ladungsschicht an der Oberfläche der Leiter fragen. Wenn keine anderen Kräfte wirkten, als die eben betrachteten der Elektrizitäten aufeinander nach Coulombs Gesetz, so würde die Schicht nicht dicker sein können als die einzelnen elektrischen Elementarquanten oder die Atome (Moleküle), an welchen sie sitzen[1]). Es wirken aber an jeder Körperoberfläche nach innen gerichtete Molekularkräfte mit (M 317), besonders auf positive Ladungsträger (135), und die Wärmebewegung (Diffusion, M 365) ist auch ständig daran beteiligt, Ladungen entgegen den Coulombschen Kräften nach innen zu treiben. Näheres hierüber ist bei flüssigen Leitern (Elektrolyten) bekannt, wonach Oberflächenladungen bei diesen etwa 30 Molekülschichten tief sitzen mit verwaschener Grenze nach innen.

Es ist das immerhin eine außerordentliche dünne Schicht, und man sieht, daß es ganz nutzlos wäre, Metallkörper, die ruhende Ladungen tragen sollen, anders als hohl, mit fast beliebig geringer Wandstärke zu nehmen.

46. Teilweise und vollständige Entladung eines Leiters an einen anderen. — Wenn die Metallkugel M (Abb. 74) an isolierender Handhabe Ladung hat, etwa von geriebener Stange, und man berührt mit ihr den auf einem Elektroskop E_1 stehenden Drahtkorb K an irgendeinem Punkt seiner äußeren Oberfläche (Abb. 74a), so verteilt sich die Ladung von M auf M und K

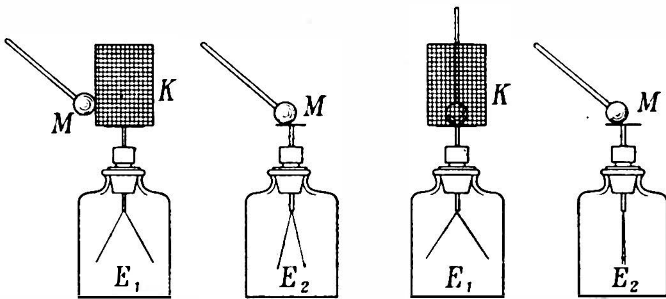


Abb. 74a, Abb. 74b. Teilweise Entladung ans Äußere eines Leiters.

Abb. 75a, Abb. 75b. Vollständige Entladung ans Innere eines Leiters.

(samt dem Elektroskop). Daher divergiert das Elektroskop E_1, Spannung und damit auch Ladung des Ganzen anzeigend, und die Divergenz bleibt bestehen, wenn M von K wieder abgetrennt wird, zum Zeichen der auf K (und das Elektroskop) übergegangenen Ladung. Berührt man dann mit der Kugel M ein zweites, ladungsfreies Elektroskop E_2 (Abb. 74b), so divergiert dieses infolge des Ladungsrestes, den M noch behalten hat. Die Teilung der Ladung ist dadurch nachgewiesen.

Man kann aber auch die ganze Ladung der Kugel M an den Drahtkorb bringen, so daß kein Rest auf ihr zurückbleibt. Es ist dazu nur erforderlich, die Berührung innen im (oben offenen) Drahtkorb vorzunehmen, wie es Abb. 75a darstellt. Zieht man dann die Kugel heraus, wobei sie aber nicht etwa oben

[1]) Eine mehrfache, durchweg geladene Molekülschicht kommt nicht in Betracht; eine Oberflächenladung, bei welcher auf je 50000 Moleküle der Oberfläche ein freies Elementarquant kommt, ist schon außerordentlich stark.

den Rand von K berühren darf, so findet man keinen Rest von Ladung mehr an ihr, wie das zweite Elektroskop zeigt (Abb. 75b). Die Oberfläche der Kugel war jetzt, bei ihrer Berührung mit dem Korb, Teil der Innenfläche desselben; deshalb ging sogleich die ganze Ladung der Kugel weg von ihr an die äußere Oberfläche des Ganzen, wo sie dann in Ruhe bleiben konnte.

Auch diese Versuche sind wieder ein Nachweis dafür, daß die Elektrizität stets die äußerste Oberfläche der Leiter aufsucht.

47. Kapazität. — Bei solchen Teilungsversuchen einer gegebenen Elektrizitätsmenge zwischen zwei Leitern, die einander berühren und also gleiche Spannung annehmen (28), wie etwa in Abb. 74a, kann allgemein gefragt werden, wieviel Elektrizität auf dem einen und wieviel auf dem anderen Leiter sich finden wird. Das Verhältnis dieser beiden Mengen ist durch die „Kapazitäten" der beiden Leiter gegeben. Der Begriff der elektrischen Kapazität, der hier auftaucht — man könnte auch Aufnahmefähigkeit oder Fassungsvermögen sagen —, verbindet die beiden Begriffe Menge und Spannung miteinander. Die Kapazität eines Leiters ist bestimmt durch die Elektrizitätsmenge, welche er bei gegebener Spannung aufnimmt; sie wird berechnet als das Verhältnis von Menge zu Spannung:

$$\text{Kapazität} = \frac{\text{Menge}}{\text{Spannung}}. \qquad 47)$$

Da Menge und Spannung einander proportional sind, solange der Leiter und seine Umgebung unverändert bleiben (32), ist die Kapazität ebensolange eine Konstante des Leiters.

48. Größe der äußeren Oberfläche wesentlich. — Da die Elektrizität in Ruhe an der Oberfläche der Leiter sitzt (38), ist es klar, daß die Kapazität in erster Linie von der Größe dieser Oberfläche abhängen wird.

Die Kugel M der Abb. 74 hat eine kleinere Kapazität als der Korb K mit Elektroskop, weil die Oberfläche der Kugel kleiner ist; es bleibt daher bei der gleichen Spannung, die beide bei der Berührung annehmen, auch der kleinere Teil der Ladung an der Kugel. Bei der anderen Berührungsart, im Versuch der Abb. 75a, im Inneren des Korbes, hat die Kugel die Kapazität Null, weil sie gar keine äußere Oberfläche hat (ihre Oberfläche nur Teil der inneren Oberfläche des Korbes ist), und bei der Kapazität Null ist nach Gl. 47 bei beliebig hoher Spannung auch die Menge Null, wie Abb. 75b schon zeigte.

Man sieht daraus, daß ein und derselbe Leiter, wie hier die Kugel, durchaus nicht immer die gleiche Kapazität haben muß, auch wenn er sich gar nicht verändert. Die Kapazität hängt offenbar von der Umgebung ab, worauf wir noch eingehend zurückkommen (101).

Einen Leiter mit veränderbarer Oberflächengröße und daher veränderbarer Kapazität stellt Abb. 76a und b dar. Ein aufrollbarer Vorhang aus Stanniol

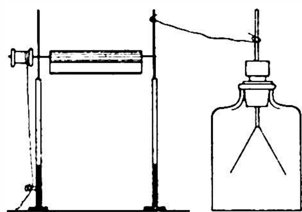


Abb. 76a.

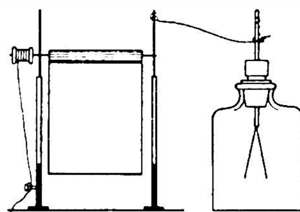


Abb. 76b.

Kapazitätsänderung durch Änderung der Oberflächengröße.

ist an zwei isolierenden Stützen befestigt und durch eine ebenfalls isolierende Seidenschnur bedienbar. Er ist leitend mit einem Elektroskop verbunden und kann mit diesem zusammen aufgeladen werden. Jedesmal, wenn der Vorhang dann hochgezogen ist, also kleine Oberfläche und daher kleine Kapazität hat, zeigt das Elektroskop hohe Spannung an (Abb. 76a), und wenn er abgerollt ist, also große Kapazität hat, zeigt es niedere Spannung an (Abb. 76b).

Der Versuch kann bei guter Isolation beliebig oft wiederholt werden. Da die Menge der Elektrizität hierbei ungeändert bleibt, entspricht dies Verhalten ganz der Gl. 47; Spannung und Kapazität sind einander verkehrt proportional.

49. Man bemerkt, daß hier die *Spannung wieder wie ein Gasdruck* sich verhält (29). Überhaupt ist jeder der drei hierunter in der Reihe A verzeichneten Begriffe für Elektrizität auf einem Leiter analog dem darunter stehenden Begriff B für Gas in einem Gefäß:

A) Elektrizität:	Menge,	Kapazität,	Spannung.
B) Gas:	Menge,	Volum,	Druck.

Gl. 47 wird damit analog Boyles und Mariottes Gesetz, nach welchem bei unveränderter Gasmenge Volum und Druck einander verkehrt proportional sind (M 356), wie hier bei unveränderter Elektizitätsmenge Kapazität und Spannung. Ersetzt man im Versuch der Abb. 76 den veränderbaren Leiter durch einen Gas enthaltenden Zylinder mit verstellbarem Kolben und das Elektroskop durch einen Gasdruckmesser, so beobachtet man beim Aus- und Einschieben des Kolbens im Zylinder die der Spannungsschwankung analoge Druckschwankung.

50. *Kapazitätseinheit.* — Mit den bereits gewählten Einheiten für Menge (15) und Spannung (33), dem Coulomb und dem Volt, ergibt sich die Kapazitätseinheit im gleichen, *elektromagnetischen* System als abgeleitete Einheit (vgl. M 12) nach Gl. 47. Sie wird Faraday zu Ehren *Farad* genannt, und es ist

$$1\ \text{Farad} = \frac{1\ \text{Coulomb}}{1\ \text{Volt}}\,. \qquad 50)$$

Das heißt: das Farad ist die Kapazität eines Leiters, der 1 Volt Spannung gegen seine Umgebung erhält, wenn man ihn mit 1 Coulomb Elektrizität belädt.

Da das Coulomb sehr groß, das Volt sehr klein ist, so ist das Farad eine außerordentlich große Einheit. Selbst eine Kugel von der Größe der Sonne, freistehend, hat noch nicht 1 Farad Kapazität (sondern nur rund 0·07 Farad). Man benutzt daher für gewöhnlich das Milliontel Farad, *Mikrofarad* genannt, als Kapazitätseinheit.

Für besonders kleine Kapazitäten wird auch die Kapazität einer alleinstehenden Kugel von 1 cm Radius als Einheit benutzt, oft kurz „*1 cm Kapazität*" genannt. Es ist dies die *absolute elektrostatische* CGS-Einheit (264) der Kapazität; sie ist nahezu gleich 1 Milliontel Mikrofarad, also 1 Billiontel Farad (genauer $1{\cdot}11 \cdot 10^{-12}$ Farad).

51. *Flächendichte der Elektrizität.* — Es bleibt jetzt die Frage nach der *Verteilung der ruhenden Elektrizität an den Oberflächen der Leiter.*

Nur auf einer alleinstehenden Kugel ist von vornherein anzunehmen, daß diese Verteilung gleichförmig sein wird, d. h. daß auf gleichen Flächenstücken überall gleich viel Elektrizität sitzen wird. In jedem Falle wird die Verteilung mittels der „Flächendichte" angegeben. Dies ist die auf der Flächeneinheit sitzende Elektrizitätsmenge oder — mit Anwendbarkeit auf beliebig kleine Oberflächenteile — die Elektrizitätsmenge ins Verhältnis gesetzt zur Größe der Fläche, auf welcher sie sitzt.

52. Kräfte an der Oberfläche geladener Leiter. — Zur Untersuchung der Frage nach der Oberflächenverteilung der Elektrizität auf Leitern kommt es wieder nur darauf an, daß für den Ruhezustand die Resultierende aller auf jede Elektrizitätsmenge des Leiters wirkenden Kräfte Null sein muß. Wir haben bisher nur die Kräfte auf die im Inneren des Leiters befindlichen Elektrizitäten betrachtet (38 u. f.); nun sind noch die Kräfte an der Oberfläche zu untersuchen.

Da sämtliche an der Gesamtoberfläche befindlichen freien Elektrizitätsquanten einander abstoßen, sind die Kräfte auf jedes einzelne derselben nach außen hin gerichtet, und es kann ihnen durch die Molekularkräfte des Leiters, welche das Auseinanderweichen von dessen Teilen verhindern, das Gleichgewicht gehalten werden (vgl. 53), jedoch nur wenn die elektrische Kraft senkrecht zur Körperoberfläche nach außen gerichtet ist. Stünde die elektrische Kraft E schief zur Körperoberfläche, wie in Abb. 77 am Punkte p nahe der bei s stark gekrümmten Körperoberfläche rst, so bliebe noch eine tangentiale Komponente T übrig, welcher das betreffende elektrische Elementarquant p folgen könnte, da es entlang der Leiteroberfläche gleiten kann, und es wäre somit die Ladung am Körper noch nicht zur Ruhe gekommen. Die Bedingung für die Ruhe an der Oberfläche ist also, daß dortselbst nur senkrecht (normal) nach außen gerichtete elektrische Kräfte vorhanden sein dürfen; eine Oberflächenverteilung, welche dieser Bedingung genügt, kann dauernd bestehen bleiben.

53. Verhalten der Elektrizität an Leiteroberflächen. — Daß den senkrecht nach außen gerichteten elektrischen Kräften durch die tatsächlich vorhandenen, senkrecht nach innen gerichteten Molekularkräfte das Gleichgewicht gehalten wird, dies ist Erfahrungssatz: Es entweicht weder positive noch negative Elektrizität bei gewöhnlicher Temperatur von den Leitern ins Vakuum. Wird die Spannung sehr hoch, so können die Molekularkräfte nicht genügen, und es werden Teile des Leiters abgerissen, wie bei Blitzschlag die Rinde von Bäumen oft weit fortgeschleudert wird[1]). Man sieht daraus, daß die Elementarquanten beiderlei Zeichens an den Atomen der Leiteroberfläche festsitzen, und zwar auch bei Metallen, wo im Inneren freie Beweglichkeit der (negativen) Quanten durch die gute Leitung ohne Mitbewegung von Atomen angezeigt ist (vgl. 13). Die besonderen Fälle der Lostrennung negativer Quanten (Elektronen) von den Atomen der Oberfläche durch genügend kurzwellige Belichtung, sowie durch hohe Temperatur untersuchen wir später als lichtelektrische, bzw. glühelektrische Wirkung (466, 476). Diese Lostrennungen erfolgen unter Energieaufwand. Um so mehr ist es bemerkenswert, daß tangentiale Kräfte ohne weiteres Ladungsverschiebung an der Oberfläche (vielleicht etwas unterhalb derselben) zur Folge haben, was ebenfalls Erfahrungstatsache ist; denn es stellt sich wirklich diejenige Verteilung der Oberflächendichten ein, welche solcher Verschieblichkeit entspricht und die im folgenden betrachtet wird.

---

[1]) Eine Kugel von 1 m Halbmesser, beladen mit 1 Coulomb (eine bei Gewittern wohl schnell verfügbare Menge) hat eine Spannung von rund 10^{10} Volt; die auf die Oberflächenladung ausgeübte Kraft ist dann $4 \cdot 10^3$ kgr/cm² = 4000 Atm., unter welchem Druck (90) die Oberflächenteile auseinanderfahren gleich den Wandteilen eines explodierenden Dampfkessels.

54. Krümmung maßgebend für die Oberflächendichte. — Die Oberflächenverteilung, welche die für Ruhe erforderlichen, nur normalen elektrischen Oberflächenkräfte ergibt, richtet sich nach der Krümmung der Oberfläche. Je stärker nach außen gekrümmt (konvex) eine Oberflächenstelle ist, desto größere Flächendichte trägt sie im Ruhezustand bei gleicher Spannung.

Man sieht dies bei Betrachtung eines Leiterstücks mit verschieden gekrümmten Stellen, z. B. einer Nadelspitze, leicht ein. Es sei (Abb. 77) rst der (vergrößerte) Längsschnitt der Spitze, und es sei deren Oberfläche gleichmäßig mit (negativer) Elektrizität bedeckt (angedeutet durch die —Zeichen der Abbildung). Es wird dann auf das Elektrizitätsquant p eine resultierende Kraft E von seiten aller anderen Quanten wirken, deren Richtung stark nach rechts, über die Spitze s hinaus weisen muß, weil fast alle p abstoßenden Elektrizitäten links von p liegen und rechts über s hinaus überhaupt keine mehr vorhanden ist. E hat daher eine starke tangentiale Komponente T, vermöge deren das Quant p gegen die Spitze s hin verschoben wird. Gleiches trifft aber auch alle andere Ladung in der Nähe von s, und die Verschiebung der Ladungen gegen s hin wird solange andauern müssen, bis dort eine so große Elektrizitätsmenge gehäuft ist, daß die bei p wirkende resultierende elektrische Kraft in die Richtung der Normalen N gedreht ist. Damit ist der Ruhezustand mit **großer Flächendichte an der Stelle starker Krümmung** hergestellt.

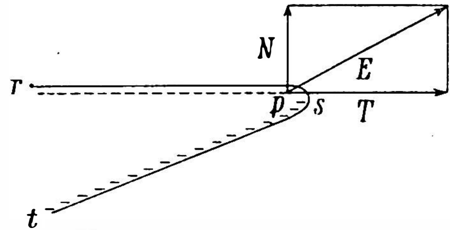


Abb. 77. Krümmungs-Einfluß.

55. Untersuchung der Flächendichte. — Man kann den Zusammenhang der Flächendichte mit der Krümmung der Leiteroberfläche mittels eines „Probescheibchens" kontrollieren, eines kleinen Metallscheibchens an isolierendem Stiele, das man an verschiedene Stellen eines auf gleichbleibender Spannung gehaltenen Leiters anlegt, wobei die Ladung der durch das Scheibchen bedeckten Fläche auf dieses übergeht und dann am Elektroskop geprüft werden kann.

Man findet, am besten an einem umfangreichen Leiter mit möglichst verschieden gekrümmten Stellen, um so mehr Ladung am Probescheibchen, je stärker nach außen gekrümmt die berührte Stelle war; nach innen gekrümmte, einspringende Stellen zeigen wenig Ladung. Letzteres bildet den Übergang zum vollständigen (oder nahe vollständigen) Fehlen von Ladung in Hohlräumen, auch wenn sie nach außen offen sind, wie der Drahtkorb in Abb. 75 es zeigte.

56. Bei **Kugeln** ist der reziproke Radius das Maß der Krümmung; dementsprechend ist die **Flächendichte** bei gleicher Spannung verkehrt proportional dem Radius. Damit stimmt es, daß die **Kapazität** einer Kugel nicht proportional ihrer Oberfläche (nicht proportional dem Quadrate ihres Radius) ist, sondern einfach proportional dem Radius; denn die Kapazität ist proportional der Menge, welche Produkt aus Flächendichte und Flächengröße ist.

57. Spitzenwirkung. — Besonders merklich wird der Krümmungseinfluß an Kanten und Spitzen von Leitern bei einigermaßen hoher Spannung. Es häuft sich an diesen stark gekrümmten Stellen so viel Elektrizität (54), daß die entsprechend großen elektrischen Kräfte, welche nahe diesen Stellen in der **Luft**

an dort vorhandenen Elektrizitäten auftreten, die Luft leitend machen. Die Ladung geht dann von der Spitze in die Luft und kann mit dieser fortströmen. Den Vorgang im einzelnen betrachten wir später (513); es sei nur hervorgehoben, daß diese „Spitzenentladung" verschieden ist von einer Funkenentladung. Der Funke entlädt plötzlich und ganz (27); die Spitze nur allmählich und bis zu einer gewissen Grenze.

Unter mehreren 100 Volt erfolgt keine Spitzenentladung. Soll aber ein Leiter wesentlich höhere Spannungen tragen, so müssen zur Vermeidung von Elektrizitätsverlusten Spitzen, Ecken und scharfe Kanten an dessen Oberfläche vermieden werden. Setzt man auf einen isolierten, mit der Influenzmaschine verbundenen Leiter eine genügend hervortretende metallische Spitze, so nimmt er trotz fortgesetzter Tätigkeit der Maschine keine nennenswerte Spannung an; alle von der Maschine gelieferte Elektrizität geht sofort an das Ende der Spitze und von dort in die Luft. Man kann so sehr gut die ganze Luft des Zimmers aufladen, ebenso wie wenn eine Flamme auf den Leiter gesetzt wird; alle Elektroskope im Zimmer beginnen dann durch Influenz von der Luft her zu divergieren.

Die Spitzenentladung ist mit nur geringer Lichtentwickelung verbunden; im dunklen Zimmer sieht man an einer negativ geladenen Spitze einen hellen Punkt, an einer positiv geladenen ein helles Büschel sitzen. Solche Erscheinungen kann man auch im Freien, besonders auf Bergeshöhen und wenn Gewitterwolken da sind, an frei hinaufragenden spitzen Gegenständen beobachten („Elmsfeuer").

Nähert man einem mit der Influenzmaschine auf hohe Spannung geladenen Leiter einen in der Hand gehaltenen, spitz endenden Draht, ohne daß Berührung einträte, so verliert der Leiter fast plötzlich seine Ladung; sie geht durch die Spitze zur Erde. Die Spitze wird hierbei durch Influenz von seiten des Leiters aufgeladen, wieder mit starker Häufung der Influenzladung am Ende der Spitze und mit Leitendwerden der Luft als Folge hiervon. Man sagt hierbei wohl: „die Spitze sauge die Ladung vom Leiter ab". Diese Wirkung von Spitzen wird bei der Reibelektrisiermaschine sowie bei der Influenzmaschine benutzt (24), um mittels Spitzenkämmen die Ladung der nichtleitenden Scheibe besser an die Leiter zu bekommen als es durch berührende „Schleifkontakte" möglich wäre.

Auch die Spitzen an Blitzableitern haben ähnliche Absicht; sie sollen die Gewitterwolke entladen. Doch erfolgt die Elektrizitätsentwicklung in Gewitterwolken meist so schnell, daß Spitzen nicht genügend folgen können; den Hauptwert haben daher immer die metallischen mit der Erde verbundenen Gestänge der Blitzableiter (44).

c) Verstehen der Erscheinungen durch die Kraftlinien.

Einführung der Kraftlinien.

58. Schwierigkeiten der Anwendung von Coulombs Gesetz. — Die im Bisherigen entwickelte Kenntnis vom Verhalten ruhender Elektrizität auf Leitern — daß sie an der Oberfläche sitzt und dort nach der Krümmung sich verteilt —, genügt nicht zur vollständigen Einsicht in alle Möglichkeiten dieser Verteilung. Ein Beispiel zeigt dies. Es sei eine Metallkugel positiv geladen; das

Bisherige zeigt dann wegen der überall gleichen Krümmung der Kugel überall gleiche Flächendichte auf ihr an. Nun werde der Kugel ein unelektrischer Leiter nahegebracht; wir wissen, daß dabei auf letzterem die schon betrachtete Influenzverteilung (18, 19, Abb. 67b) auftritt. Damit ist aber der Vorgang noch nicht zu Ende; es wird nicht nur die negative Influenzladung von der positiven Ladung der Kugel angezogen, sondern es zieht auch umgekehrt diese Influenzladung die positive Ladung der Kugel an sich, und dies muß eine Änderung der ursprünglich gleichförmigen Verteilung dieser Ladung auf der Kugel zur Folge haben. Es wird somit klar, daß die Ladungsverteilung nur nach der Krümmung überhaupt nur dann gelten kann, wenn der geladene Körper allein im Raume ist, und daß die genaue Verteilung von der ganzen Umgebung des geladenen Leiters abhängig ist. Auch dies, sowie die früher schon bemerkte Notwendigkeit, bei der Influenz auch die gegenseitigen Kräfte der influenzierten Ladungen zu berücksichtigen (19), geht keineswegs über Coulombs Gesetz hinaus; man sieht aber, daß die durchgreifende Anwendung dieses an sich einfachen Gesetzes selbst im Falle einfacher Leiterformen, wie etwa bei zwei Kugeln, eine gar nicht einfache Sache ist. Das Besondere der Schwierigkeit besteht darin, daß nicht nur die unzähligen Kräfte in Betracht kommen, die zwischen je zwei der vorhandenen elektrischen Quanten wirken, sondern daß außerdem diese Quanten, die Zentren der Kräfte, gar keine feste Lagerung haben, indem sie sich je nach den Kräften auf den Leitern verschieben können.

59. Rechenmethoden, die wenig mit der Natur zu tun haben. — Zur Überwindung dieser Schwierigkeiten sind die Methoden der schon erwähnten Potentialrechnung (Potentialtheorie, 38) erdacht; aber diese sind wieder, selbst für einfache Fälle, wie z. B. bei kugelförmigen Leitern, von ganz erheblicher Umständlichkeit, und man lernt bei den Rechnungen nichts für die Natur, so wertvoll auch die Ergebnisse sind. Was umständliche Rechen-Umwege erfordert, ist überhaupt nicht geeignet, den verborgenen Naturdingen, welche den Erscheinungen zugrunde liegen, näher zu kommen.

60. Ein neuer Begriff. — Es ist daher in hohem Maße wichtig, daß ein Ersatz für diese Rechenkünste vorhanden ist, der ihre allgemeinen Ergebnisse voll zusammenfaßt, der aber auf jedem Schritt unmittelbar mit den Naturdingen sich befaßt, — ein Weg, der für einfachste wie verwickeltste Fälle gleich gangbar ist und immer schnell die Hauptsachen sehen läßt, sei es auch nur in den großen Zügen: der Weg der Kraftlinien, die einen neuen Begriff zum Denken mit der Natur bedeuten. Ist auch für quantitative Einzelheiten manchmal die erwähnte Rechnung unentbehrlich, so wird auch sie durch die Zuhilfenahme der Kraftlinien wirksam geleitet und oft sehr abgekürzt.

Der Weg der Kraftlinien reicht aber außerdem noch weit hinaus über die Potentialrechnung, nämlich über die Gültigkeitsgrenzen von Coulombs Gesetz, worüber das Folgende eine Zusammenstellung bietet.

61. Umfassende Bedeutung der Kraftlinien. — Der mit besonderen, der Natur angepaßten Eigenschaften ausgestattete Begriff der Kraftlinien ist von Faraday allmählich (von 1830 an) aus der Naturbeobachtung, beginnend besonders beim Studium der Influenz, entwickelt worden; Maxwell hat später die so gewonnene, reiche Zusammenfassung von Naturkenntnis in diesen einzigen Begriff der Kraftlinien noch weiter vervollständigt. Die damit erlangte Kenntnis

gibt nicht nur Aufschluß über die Verteilung der Elektrizitäten an den Leitern und in Nichtleitern (74 u. f.) und dazu gleichzeitig auch über die Verteilung der von den Elektrizitäten ausgeübten Kräfte im ganzen Raum (66 u. f.) und auf die Leiter selbst (87 u. f.) — hierin gleichwertig mit Coulombs Gesetz —, sondern sie umfaßt auch die Fälle, in welchen Coulombs Gesetz einer Vervollständigung bedarf, wenn nämlich materielle Isolatoren im Raum zwischen den Leitern sind (108). Weiter werden Kraftlinien ebensogut wie in der Elektrostatik auch für alle Fälle von bewegter Elektrizität — in der ganzen Elektrodynamik mit Einschluß des Magnetismus — uns noch Führer sein und Einsicht in die Vorgänge liefern, wo Coulombs Gesetz vollkommen versagt (422), so daß wir bis zum Schluß der Elektrizitätslehre mit ihnen zu denken haben werden.

Es ist nach diesem Ursprung und nach diesen Erfolgen des Denkens mit den Kraftlinien gar nicht zu bezweifeln, daß der Begriff so vollkommen der Wirklichkeit angepaßt ist, daß ihm gefundene Naturdinge entsprechen. Als von solchen werden wir in allem folgenden auch von den Kraftlinien reden, als von raumerfüllenden Gegenständen, die nur so lange verborgen bleiben mußten, weil uns das Wahrnehmungsorgan für sie fehlt (vgl. 1). Sie sind die Naturdinge, von deren Tätigkeit alle die wahrnehmbaren elektrischen und magnetischen Erscheinungen nur Symptome, für sich allein unverständliche Äußerungen sind. Der umfassenden Bedeutung der Kraftlinien entspricht auch ihr enger Zusammenhang mit der alle Naturvorgänge regelnden Energie (122 u. f.). Wir erkennen die Kraftlinien als Energieverteilungen im Raume; elektrische und magnetische Kraftlinien zusammen sind überhaupt die einzige Gestalt, in welcher Energie außerhalb von Atomen erscheint (129, 587).

Wenn wir von Kraftlinien als von Raumgegenständen reden, so meinen wir somit Energieaufhäufung im betreffenden Raume, deren Verteilung durch die Linien dargestellt ist. Die Energie mit ihrer Masse und ihrem Gewicht (434, 582) ist das tatsächlich im Kraftlinienraum vorhandene und wirkende (129).

62. Übersicht zur Elektrostatik und Elektrodynamik; zweierlei Kraftlinien. — Wir werden allmählich die Eigenschaften zunächst der elektrischen Kraftlinien entwickeln und zwar hier in der Elektrostatik vornehmlich für den Ruhezustand (64—129), dann die magnetischen Kraftlinien hinzunehmen (236—327) und endlich die Verknüpfungen dieser beiden Kraftlinienarten behandeln (328 u. f.). Damit sind alle gut bekannten elektrischen und magnetischen Vorgänge umfaßt.

Wir werden diese fortschreitende Darlegung der Eigenschaften der Kraftlinien nach Einführung der zugehörigen Hilfsbegriffe eingehend in Worten geben können. Eine teilweise Zusammenfassung finden die Eigenschaften der Kraftlinien in Maxwells Gleichungen (406).

63. Grenzen im Inneren der Atome. — Die Kenntnis der Eigenschaften der Kraftlinien, soweit dieselben in den großen Räumen außerhalb der Atome verlaufen, scheint heute schon vollständig zu sein; was innerhalb der Atome an den unzweifelhaft darin befindlichen Elektrizitäten (526 u. f.) vorgeht, ist dagegen wenig bekannt, ja vergleichsweise ganz dunkel. Dabei ist es höchst bemerkenswert, daß alle Kraftlinien der großen Räume nur aus Atomen genommen, aus deren winzigen Abmessungen heraus gewissermaßen in die Länge gezogen sind (127 u. f.) zu räumlich beliebig ausgedehnter Wirkung mit Einschluß aller technischen Benutzungen. Dies läßt annehmen, daß Kraftlinien auch in den Atomen ihre Bedeutung haben werden,

wenn auch wohl in anderer Weise als außen und mit anderen, noch unbekannten Eigenschaften.

Die elektrischen Kraftlinien und ihre Eigenschaften.

64. Elektrische Kraft. — Wir betrachten zunächst in Anknüpfung an frühe Kenntnis (3) hauptsächlich den einfachsten Fall des leeren Raumes — des freien Äthers — zwischen elektrischen Körpern, wobei übrigens Anwesenheit von Luft nur sehr wenig ändert.

Bringt man an eine Stelle des Raumes zwischen elektrisch geladenen Körpern noch einen geladenen Körper — als Prüfkörper —, so erfährt er eine Kraft, die wir bisher als durch Coulombs Gesetz gegeben betrachtet haben. Wir betrachten sie von jetzt ab in anderer Weise, nämlich als bedingt durch die Anwesenheit von Kraftlinien an der betreffenden Stelle. Die Kraftlinien sind auch ohne Hinbringung des Prüfkörpers dort; derselbe dient nur zum Wahrnehmbarmachen der Kraftlinien. Wir nennen die auf den Prüfkörper ausgeübte (mechanische) Kraft[1] „elektrische Kraft an der betreffenden Raumstelle". „Elektrische Kraft" ist demnach überall im Raum um geladene Leiter oder Nichtleiter herum; sie kommt aber auch — wie Späteres zeigt (417 u. f.) — ganz ohne Vorhandensein freier Elektrizitäten vor. Sie ist Grundlage zur Festhaltung des Kraftlinienbegriffes (66).

Das Maß der elektrischen Kraft ist die mechanische Kraft, welche auf eine probeweise an den betreffenden Punkt gebrachte Einheitsmenge wirkt.

Man bemerkt, daß elektrische Kraft hiernach ebenso eine Vektorgröße ist, wie Kraft überhaupt (M 75); sie hat Größe und Richtung; ihre Größe ist die Größe der mechanischen Kraft, ihre Richtung ist deren Richtung. Die Richtung wird eindeutig durch Festsetzung stets positiver Ladung des Prüfkörpers. Hiernach sind elektrische Kräfte ebenso durch Linienstrecken darstellbar wie alle anderen Vektorgrößen. Es gilt für sie erfahrungsmäßig auch die ungestörte Übereinanderlagerung (M 45); elektrische Kräfte sind daher mit ihresgleichen nach dem Parallelogrammsatz zusammensetzbar, und ebenso sind sie zerlegbar. Alle Rechnungen nach Coulombs Gesetz zeigen dies durch ihre Gültigkeit (82).

65. Das elektrische Feld. — Ein Raum, in welchem elektrische Kräfte (und also Kraftlinien) vorhanden sind, heißt „elektrisches Feld". Die Größe der elektrischen Kraft wird auch Stärke des elektrischen Feldes oder kurz Feldstärke am betreffenden Punkt genannt.

Die in der angegebenen Weise zur Untersuchung des Feldes dienende Einheitsladung darf das Feld (d. i. die dort befindlichen Kraftlinien) nicht merklich ändern; sie muß dazu genügend klein sein[2]. Um dies zu berücksichtigen, kann

[1]) Wir nennen hier — zur Unterscheidung von der nun einzuführenden „elektrischen Kraft" — die in der Mechanik ganz allgemein definierte Kraft (M 62) manchmal „mechanische Kraft".

[2]) Die störenden Änderungen am Felde, welche die Probeladung mit sich bringt, bestehen in der Influenzierung der umgebenden Leiter, die neue Kräfte hinzubringt. Diese Kräfte sind dem Quadrat der Probemenge proportional (vgl. das Beispiel mit der Kugel und der Wand, 96), während die Kraft des zu messenden Feldes ihrer ersten Potenz proportional ist; es treten daher die Störungen um so mehr zurück, je kleiner die Probeladung gewählt wird. Beliebig klein können allerdings die Störungen nicht gemacht werden, weil man keine kleinere Elektrizitätsmenge kennt als das Elementarquant. Dies käme bei allerschwächsten, zu messenden Feldern in Betracht. Für alle Fälle einwandfrei kann man die Feldbemessung machen, wenn man von der im Feld

man, da mechanische Kraft und Ladung im gleichen Feld stets einander proportional sind[1]), die elektrische Kraft oder Feldstärke definieren als das Verhältnis zwischen mechanischer Kraft und beliebig kleiner Probeladung an der betreffenden Raumstelle. Dieses Verhältnis ist gleich der Kraft auf die Mengeneinheit, in welcher die Probemenge gemessen war, stimmt also mit der ursprünglichen Definition (64), wobei nun die benutzte Mengeneinheit (15) von beliebiger Größe sein kann.

Benutzt man als Mengeneinheit die elektrostatische CGS-Einheit (15) und als Krafteinheit das dyn, so hat man die elektrostatische CGS-Feldeinheit (die elektromagnetische Einheit s. unter 95).

66. Elektrische Kraftlinien. — Elektrische Kraftlinie ist eine Linie, die überall die Richtung der elektrischen Kraft hat, so daß jede ihrer Tangenten die Kraftrichtung im Berührungspunkt angibt. Im allgemeinen, bei beliebig verteilten Kraftrichtungen, sind die Kraftlinien gekrümmt. Kennt man mittels der Probeladung (64, 65) im ganzen Feld die Kraftrichtungen, so kann man demnach die Kraftlinien überall im Felde ziehen; man erhält so ein Kraftlinienbild des Feldes. Umgekehrt lehrt ein solches Kraftlinienbild unmittelbar und übersichtlich die Verteilung der Kraftrichtungen kennen.

Die Abb. 78—82 sind Beispiele hierfür. Diese Bilder sind räumlich ergänzt zu denken, indem außer den in die Zeichnungsebene fallenden Kraftlinien auch vor und hinter derselben gleichgeformte Kraftlinien in leicht vorstellbarer Weise laufen, so daß der ganze Raum des elektrischen Feldes von ihnen durchzogen ist.

67. Darstellung der Größe der elektrischen Kräfte durch die Kraftlinien. — Festzuhalten ist, daß die Darstellung der Felder durch voneinander getrennte Kraftlinien, wie in den Abbildungen, nicht etwa als räumlich ungleichmäßige Beschaffenheit der Felder gedeutet werden darf. Man würde zwischen je zwei gezeichnete Kraftlinien solcher Bilder noch beliebig viele weitere einschalten können, die ebenso richtige Kraftlinien wären; jedoch kann man die Zahl der einzuzeichnenden Kraftlinien so wählen, daß außer der Richtung auch die Größe der elektrischen Kraft, die Feldstärke (65) überall zur Darstellung kommt. Die Kraftlinien sind dazu an jeder Stelle in solcher Fülle zu zeichnen, daß die Größe der Kraft im materiefreien Raum[2]) gegeben ist durch die Zahl der Kraftlinien, welche die ihnen an der betreffenden Feldstelle senkrecht gegenüber gestellte Flächeneinheit durchsetzt oder, wie wir kurz sagen wollen, durch die Dichte der Kraftlinien an der betreffenden Stelle. Dies ist in den Abbildungen überall durchgeführt. Je dichter die Kraftlinien an einer Stelle beisammen stehen, desto stärker ist dort das Feld.

---

gemessenen Kraft die Kraft subtrahiert, welche an der gleichen Probeladung in der gleichen Umgebung aber ohne Feld gemessen wird, wenn das möglich ist. Mit der Berücksichtigung von Störungen wird man immer zu tun haben, wenn Felder durch Einbringung von Prüfkörpern gemessen werden, sei es unmittelbar nach der Definition, wie hier gedacht, oder auf Umwegen (z. B. mit dem Tropfsammler, 97). Nur wenn die Messung mittels der Kräfte erfolgt, die auf die zum Felde selbst gehörenden Leiter wirken, fallen die Störungen weg (vgl. das Beispiel des Plattenkondensators, 91).

[1]) Diese Proportionalität ist gleichbedeutend mit der gegenseitigen Nichtstörung der auf die einzelnen Elementarquanten der benutzten Probeladung ausgeübten Kräfte.

[2]) Laufen Kraftlinien durch Materie, so ist die Größe der Kraft verändert, worauf wir später besonders eingehen (110). Luft ist aber in dieser Hinsicht vom Vakuum so wenig verschieden, daß wir das für jetzt außer acht lassen können.

Wir entwickeln nun an der Hand einiger charakteristischer Kraftlinienbilder, auf deren Herstellung wir später eingehen (82), eine Reihe von Sätzen über Kraftlinieneigenschaften, wobei schon vorher nachgewiesene Kenntnisse benutzt werden. Die Hauptbeweise der Richtigkeit liegen übrigens in der Übereinstimmung von allem, was die Kraftlinien schon geboten haben[1]) (vgl. 61), mit der Wirklichkeit.

68. Wir betrachten zuerst den Fall des Feldes zwischen zwei konzentrischen Kugeln (Abb. 78). Die innere Kugel sei positiv geladen, die äußere mit der Erde verbunden; sie hat dann negative Influenzladung. Man kann das als den geometrisch vereinfachten Fall einer mitten im Zimmer isoliert aufgestellten geladenen Kugel auffassen. Die Kraftlinien sind hier alle gradlinig radial und rings um die Kugel gleichmäßig verteilt. Ersteres bedeutet die überall vom Mittelpunkt weggerichtete Kraft, letzteres die in gleichen Abständen vom Mittelpunkt überall gleich große Kraft, beides entsprechend Coulombs Gesetz und der allseitigen Symmetrie der Kugel. Auch die Abnahme der Kraft, verkehrt proportional dem Abstandsquadrat vom Kugelmittelpunkt, ist — nach der Bedeutung der Kraftlinienzahl durch die Flächeneinheit (67) — im gradlinig von diesem Mittelpunkt aus divergierenden Kraftlinienlauf mit eingeschlossen[2]). Dabei könnte der Radius sowohl der äußeren als der inneren Kugel beliebig vergrößert oder auch verkleinert werden, ohne daß die Gesamtdarstellung der Kraftverteilung ihre Gültigkeit verlöre. Die äußere Kugel könnte auch in unendlicher Entfernung sein; die innere Kugel könnte auch zu einem Punkt zusammenschrumpfen. Man sieht aus letzterem, daß eine geladene Kugel nach außen hin stets die gleichen Kräfte ausübt wie ihre in ihrem Mittelpunkt vereinigte Ladung (vgl. 74).

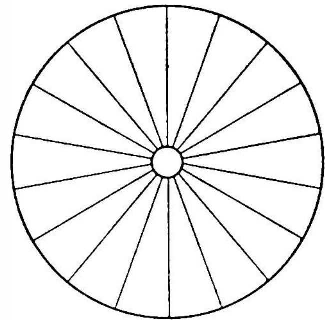


Abb. 78. Geladene Kugel in konzentrischem Zimmer.

Man bemerkt, daß eine von Coulombs Gesetz abweichende Kraftlinienverteilung, nach einer noch so wenig höheren oder niedrigeren Potenz des Abstandes, als der 2ten, die Folge hätte, daß ein Teil der von der inneren Kugel ausgehenden Kraftlinien frei im Raum enden müßte, oder daß neue Kraftlinien im Raum anfangen müßten, um Richtung und Größe der Kraft richtig darzustellen, was aber wegen der genauen Gültigkeit von Coulombs Gesetz (40) nicht der Fall ist. Hierbei tritt eine allgemeine Eigenschaft aller Kraftlinien hervor: Nie endet eine Kraftlinie frei im Raume, noch fängt eine frei im Raume an, und man sieht, daß diese Eigenschaft durch Coulombs Gesetz bedingt ist.

69. Anfang und Ende der Kraftlinien findet sich im betrachteten Falle an den Leiteroberflächen; ins Innere von Leitern können sich Kraftlinien

[1]) Mit Einschluß ihrer Anwendungen in Gestalt von Maxwells Gleichungen (Anhang EVa, Bd. IV).

[2]) Wer dies nicht unmittelbar einsieht, vergleiche den analogen Fall von Abb. 4 in der Optik mit dazugehörigen Erläuterungen (O 16).

bei ruhender Elektrizität niemals fortsetzen, und dies gilt auch ganz allgemein, weil dort, wie wir sahen (19, 38, 39, 41, 43), keine Kräfte vorhanden sind.

70. Ein anderer wichtiger Satz ist dieser: Es stehen bei ruhender Elektrizität die Kraftlinien stets senkrecht zu den Leiteroberflächen, weil es an diesen Oberflächen, wie wir sahen (52), nur normale (zur Fläche senkrechte) Kräfte gibt. Dies Senkrechtstehen der Kraftlinien an den Leiteroberflächen sieht man auch überall in den anderen Abbildungen, 79—83.

71. Ein fernerer Satz: Niemals schneiden einander zwei Kraftlinien. Dies ist aus der Definition der Kraftlinien (66) selbstverständlich; denn es wären am Schnittpunkt mit den zwei Kraftlinien auch zwei verschiedene Kraftrichtungen gleichzeitig vorhanden, während die Kraft doch überall nur eine bestimmte Richtung haben kann.

72. An den Leiteroberflächen, also wo die Kraftlinien enden (69), ist zugleich, wie wir sahen (38), der Sitz der Elektrizitäten; es zeigt sich somit ein weiterer, für alle elektrischen Kraftlinien gültiger Satz: Jede Kraftlinie hat Anfang und Ende dort — und nur dort — wo die freien Elektrizitäten sitzen[1]). Und zwar sind es die beiden entgegengesetzten Elektrizitäten, die an den beiden Enden jeder Kraftlinie sitzen. Denn es hat jede Kraftlinie ihrer Bedeutung nach (66) einen bestimmten Richtungssinn — etwa durch einen Pfeil auf ihr zu bezeichnen —, der angibt, wohin positive Elektrizität, im Felde freigelassen, getrieben würde; sie würde von dem Kraftlinienende, an welchem positive Elektrizität sitzt, längs der Kraftlinie fortgetrieben werden bis an ihr anderes Ende, an welchem, dieser Bewegung entsprechend, negative Elektrizität sitzen muß.

73. Es sind aber festbestimmte Mengen der beiden Elektrizitäten, die den beiden Enden jeder einzelnen Kraftlinie zugehören.

Um dies einzusehen, beweisen wir zunächst einen anderen, an sich wichtigen Satz: daß nämlich die Größe der Normalkraft (70) an jeder Leiteroberfläche proportional sein muß der elektrischen Flächendichte (51) dortselbst.

Es sei E_n die Größe dieser Normalkraft an einem Punkte A dicht außen an der Oberfläche des geladenen Leiters. Daß ein beträchtlicher Teil dieser Kraft von der Elektrizität an der A benachbarten Oberflächenstelle herrührt, also der dortigen Flächendichte proportional sein muß, ist nach Coulombs Gesetz klar wegen der unmittelbaren Nähe; es kommt also nur darauf an zu zeigen, daß es ein für alle Fälle fest bestimmter Bruchteil der Gesamtkraft E_n ist, welcher von dieser benachbarten Stelle ausgeht. Es ist leicht zu sehen, daß es in allen Fällen die Hälfte ist. Man fasse dazu nächst dem dicht außerhalb der Oberfläche gelegenen Punkt A einen dicht innerhalb, bei derselben Oberflächenstelle gelegenen Punkt B ins Auge. In A wirkt die Normalkraft E_n, in B wirkt keine Kraft, weil dieser Punkt im Inneren des Leiters liegt. Dieser Unterschied der Kräfte im vollen Betrage von E_n kann nur daher kommen, daß die von dem Oberflächenstück in nächster Umgebung von A und B ausgeübte Kraft beim Übergang von A nach B ihre Richtung umkehrt, welches letztere selbstverständlich ist; die von den entfernteren Teilen des Leiters ausgeübten Kräfte bleiben so gut wie ungeändert, weil die Abstände beim Übergang von A zu B so gut wie ungeändert bleiben. Dann muß aber die vom Oberflächenstück der nächsten Umgebung

[1]) Dieses Nicht-Enden der Kraftlinien, ausgenommen nur an freien Elektrizitäten, welche die natürlichen Enden der elektrischen Kraftlinien sind, ist in unserer, auf höchste Vereinfachung bei Umfassung aller Kenntnis eingerichteten Kraftlinienvorstellung ganz allgemeine Krafttlinieneigenschaft; sie gilt überall, auch bei Raumerfüllung mit beliebiger Materie. (Vgl. über sonst eingeführte „Kraftlinien" 254, auch Note zu 107 und Anhang E V a, 1, Bd. IV).

ausgeübte Kraft $E_n/2$ sein, und die andere Hälfte von E_n muß von dem ganzen Rest der Oberfläche des Leiters ausgeübt sein; denn dies ergibt die Kraft in A $E_n/2 + E_n/2 = E_n$ und in B $E_n/2 - E_n/2 = 0$, wie es sein soll. Dies gilt für jede beliebige Leiterform, und es ist daher stets, so wie die Hälfte der Normalkraft, so auch die ganze Normalkraft E_n an jeder Oberflächenstelle eines mit ruhender Elektrizität geladenen Leiters der Flächendichte dortselbst proportional.

Daß bei diesem Beweise eine scharfe Abgrenzung des wirksamen Oberflächenstücks vom Reste der Gesamtoberfläche des Leiters unwesentlich ist, dies ergibt sich daraus, daß von der ganzen Gegend dieser Grenze überhaupt nur tangentiale Kräfte auf A oder B ausgeübt werden, also Kräfte, die zu E_n nichts beitragen.

74. Da Flächendichte die Elektrizitätsmenge an der Flächeneinheit ist, die Normalkraft aber Zahl der Kraftlinien, die an derselben Flächeneinheit enden (67), so bedeutet die nachgewiesene Proportionalität beider (73), daß zu jedem Kraftlinienende eine bestimmte Elektrizitätsmenge gehört. Umgekehrt gehört auch zu jeder Elektrizitätsmenge eine bestimmte Kraftlinienzahl, die von ihr ausgeht.

Wie viele Kraftlinien zur Einheit der Elektrizitätsmenge gehören, dies hängt von der Wahl der Einheiten ab. Zur absoluten elektrostatischen Mengeneinheit (15) gehören 4π Kraftlinien. Dies ist leicht einzusehen. Denn es soll diese Mengeneinheit ihresgleichen in 1 cm Abstand mit der Kraft Eins (1 dyn) abstoßen; dann muß in diesem Abstand, d. i. auf der ganzen Kugel von 4π cm² Oberfläche, diese Einheitskraft herrschen, d. i. je 1 Kraftlinie auf 1 cm² kommen (67), was im ganzen die 4π Kraftlinien gibt.

75. 4π ist demnach in elektrostatischen CGS-Einheiten auch der Proportionalitätsfaktor (73) zwischen Flächendichte σ und Normalkraft oder Feld E_n, so daß

$$E_n = 4\pi\sigma. \qquad 75)$$

76. Elektrisches Feld der Elementarquanten. — Das Natürlichste wäre es, soweit zu sehen, jedem Elementarquant der Elektrizität, als der naturgegebenen Mengeneinheit (15), eine Kraftlinie als unzertrennliches Zubehör zuzuschreiben, oder auch: die Elementarquanten als Kraftlinienenden anzusehen. Jedoch, das Kraftfeld des einzelnen Elementarquants ist unbekannt; man weiß nicht, ob es die Einseitigkeit besitzt, die durch das Vorhandensein nur einer Kraftlinie an ihm angezeigt wäre[1]); man hat befriedigende Erfahrung bisher nur an Kraftfeldern, die zu sehr vielen Elementarquanten gehören oder die von sehr vielen solchen genommen sind (vgl. 464 und 482 u. f.). In den gewählten, elektrostatischen CGS-Einheiten hat das Elektron $4\pi e$ Kraftlinien, wenn e (Tab. 45) die ihm zugehörende Elektrizitätsmenge in der elektrostatischen CGS-Einheit ist (74).

77. Paarweises Vorhandensein der Elektrizitäten. — Aufs unmittelbarste zeigen die Kraftlinien die paarweise Zusammengehörigkeit gleicher Mengen positiver und negativer Elektrizität. Am Anfang jeder Kraftlinie sitzt eine bestimmte Menge Elektrizität der einen Art, und die angefangene Kraftlinie muß irgendwo in der Welt auch ein Ende haben, an welchem dann unvermeidlich die gleiche Menge der Elektrizität der anderen Art zu finden ist (72—74). So ist es unmittelbar klar, daß man die beiden Elektrizitäten zwar weit voneinander trennen und daher auch einzeln benutzen kann, daß sie aber doch stets paarweise vorhanden sind, welche Tatsache durch die Erfahrung gegeben ist, daß auf keinem Wege nur eine der Elektrizitäten allein zu erhalten ist, sondern daß es immer nur auf Trennung beider Elektrizitäten voneinander ankommt (10). Ursprünglich sind sie stets beide in den Atomen der Materie vorrätig (529), als Elementarquanten, dicht nebeneinander, verbunden durch entsprechend kurze Kraftlinien;

[1]) Es sind schon mehrere Wege zur Beobachtung weniger und sogar einzelner Elementarquanten vorhanden, so daß künftige Erfahrung wohl Neues hierzu bringen könnte. Man bemerke, daß die Annahme von Valenzladungen der Atome in festen Kristallen (wie z. B. Na_4Cl_4 in Abb. 58, Bd. I) das Vorhandensein nur einer Kraftlinie am Elektron ausschließt. Diese Ladungen der Kristallatome wären noch vielseitig nachzuprüfen.

bei der Trennung werden diese Kraftlinien, die immer die beiden Elektrizitäten miteinander verbinden, lang gezogen (vgl. 127).

78. Bedeutung der Erdableitung. — Aufs unmittelbarste wird durch die Kraftlinien auch die genaue Bedeutung einer Erdableitung klar. Leitet man bei einem der Trennungsvorgänge der beiden Elektrizitäten die nichtbenutzte Elektrizität zur Erde ab (vgl. 10, 24), so sehen wir jetzt, daß dies nicht etwa ein spurloses Verlaufen der abgeleiteten Elektrizität in oder an der großen Erdkugel bedeutet. Wir sehen beispielsweise von einer geriebenen Siegellackstange, nach weggelegtem Reibzeug, die ihrer negativen Ladung zugehörigen Kraftlinien ausgehen und weiterlaufen, und wir wissen, daß sie die Wände des Zimmers nicht durchsetzen können, weil diese genügend leitend sind, sondern daß sie also an diesen enden müssen und daß somit dort die der Stangenladung gleiche positive Menge verteilt sitzen muß, im wesentlichen nach Maßgabe der Abb. 78. Die vom Reibzeug zur Erde gegangene positive Elektrizität ist also noch im Zimmer, stets bereit mit der negativen sich wieder zu vereinigen; sie ist an den leitenden Tisch- und Zimmerwänden entlang geglitten — geführt von den Kraftlinien, wie wir sehen werden —, bis die Gleichgewichtsverteilung erreicht war.

79. Zwei entgegengesetzt gleich geladene Kugeln. — Überblicken wir noch einige weitere Kraftlinienbilder zur Veranschaulichung der bisher schon bemerkten Kraftlinieneigenschaften, so sehen wir, daß Abb. 79 zwei entgegengesetzt geladene Kugeln darstellen muß; denn die von der einen Kugel ausgehenden Kraftlinien enden an der anderen und zwar vollzählig, welches letztere zeigt, daß ihre Ladungen entgegengesetzt gleich sein müssen.

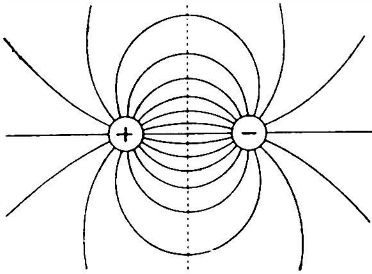


Abb. 79. Zwei entgegengesetzt gleich geladene Kugeln.

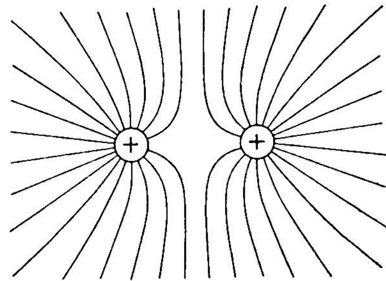


Abb. 80. Zwei gleichnamig gleich geladene Kugeln.

80. Zwei gleichgeladene Kugeln. — In Abb. 80 sind die Ladungen der beiden Kugeln ebenfalls von gleicher Größe, was aus der gleichen Anzahl der Kraftlinien zu sehen ist, die von ihnen ausgehen; aber sie sind vom selben Zeichen, weil keine der Kraftlinien der einen Kugel nach der anderen hinläuft. Wäre die Zeichnung nach außen hin weiter fortgesetzt, so würde man sehen, daß sämtliche Kraftlinien zunehmend genau radikal auseinanderlaufen, als wären sie von einer einzigen Kugel mit der doppelten Ladung gekommen, bis sie schließlich an irgendwelchen Wänden enden müssen, wo dann die andere Elektrizität sitzt.

81. Fall der Influenz. — In Abb. 81 sieht man die von der Kugel A ausgehenden Kraftlinien teils in große Ferne laufen, teils an der anderen Kugel B enden. Es laufen aber von letzterer Kugel auch neue Kraftlinien aus, und zwar ebensoviele als an ihr von A her enden. Dies zeigt, daß diese Kugel ebensoviel positive als negative freie Elektrizität hat (was in der Abbildung auch durch die Zeichen — und + angedeutet ist), während die Kugel A eine größere freie Menge nur des einen Zeichens (+) hat. Es ist dies die vollständige Darstellung des früher in schematischer Weise schon betrachteten Falles der Influenz (vgl. Abb. 67b). Die Kugel A hat die influenzierende Ladung; die Kugel B, ebenfalls isoliert und ursprünglich unelektrisch, ist influenziert. Der Vorgang der Influenzierung besteht darin, daß beim Heranbringen der Kugel B in die Nähe von A Kraftlinien, die von A ausgehen, an B zertrennt werden, weil sie im Leiter nicht bestehen können; die Zertrennung ist möglich, weil die Kraftlinien an den vorhandenen Elektrizitäten des Leiters neue Enden finden (vgl. dazu 85), die bis an seine Grenzen verschoben werden können. Dort muß dann alles so sich einrichten, daß auch alle neuen Kraftlinienenden senkrecht zur Oberfläche zu stehen kommen (70), wie die Abb. 81 es zeigt.

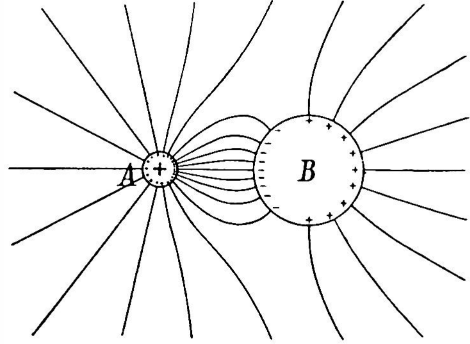


Abb. 81. Influenz.

82. Herstellung von Kraftlinienbildern. — Es ist jetzt die Frage, wie man zu richtigen Kraftliniendarstellungen kommt, deren wir in den Abb. 78 bis 81 schon mehrere betrachtet haben.

Jedenfalls können die Kraftlinien ruhender Elektrizitäten in Luft stets einfach nach Coulombs Gesetz ermittelt und gezeichnet werden, wenn fest im Raum verteilte Ladungen, z. B. an kleinen (punktförmigen) Leitern oder an Nichtleitern sitzend, gegeben sind. Bei verschieblichen, jedoch zur Ruhe gekommenen Ladungen (an größeren Leitern oder in Influenzfällen) kommt die Potentialrechnung zu Hilfe (38), und hiernach sind auch die Abb. 79—81 und 83 gezeichnet. Im Falle bewegter Ladungen können Maxwells Gleichungen benutzt werden, wovon 421 ein Beispiel gibt.

Hat man die Leiter in fertiger Ausführung und geladen vor sich, so kann der Kraftlinienlauf in ihrer Umgebung auf Grund der Definition der Kraftlinien (66) mittels Prüfkörpers (64) festgestellt werden. Es kann aber der Kraftlinienlauf auch einfacher experimentell untersucht werden. Kleine, leicht bewegliche, etwas längliche (nicht kugelförmige) Stücke eines schwachen (das Feld nicht zu sehr beeinflussenden) Leiters, wie etwa Seidenpapierstreifen, stellen sich mit ihrer Längsrichtung überall im Felde in Kraftlinienrichtung ein, wirken also als Kraftlinienzeiger. Es ist das leicht verständlich, weile diese Leiterstücke im Feld Influenzladungen erhalten, die ihnen ein Drehmoment erteilen, das sie in die Kraftrichtung bringen muß. So stellt

sich der Seidenpapierstreifen a b (Abb. 82) als Kraftlinienzeiger überall senkrecht zu dem geladenen Leiter L ein, wenn er, an leichtem Faden gehalten (dessen anderes Ende an einer Glasstange gehandhabt wird) hingebracht wird. Der Busch von Seidenpapierstreifen, an leitendem Stiel auf den geladenen Leiter gestellt (vorher schon als Spannungszeiger benutzt, 26), zeigt die von seinem Befestigungspunkt P ausgehenden Kraftlinien. Ist die Scheibe S S nicht vorhanden, so divergieren die Streifen (etwa wie in Abb. 73) gegen die Zimmerwände hin, gleich den Kraftlinien in Abb. 78. Bringt man die Metallscheibe S S, an dem Stiele H in der Hand gehalten, also zur Erde abgeleitet, an den Busch, so nehmen seine Papierstreifen die in der Abb. 82 gezeichneten Formen an; die Kraftlinien von P enden jetzt senkrecht an der Scheibe S S (die punktierte Linie ist eine durch die Streifen nicht dargestellte, an der abgewandten Seite der Scheibe endende Kraftlinie). Hält man statt der Scheibe eine Metallkugel hin, so zeigen die Papierstreifen zwischen ihr und P etwa die Kraftlinienformen von Abb. 79. Auch längliche dielektrische Körper können statt der Papierstücke dienen (vgl. 112).

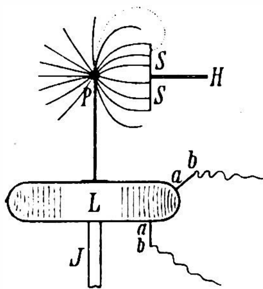


Abb. 82. Papierstreifen als (rohe) elektrische Kraftlinienzeiger.

Die experimentelle Ermittelung der Kraftlinien ist indessen unbefriedigend, da fremde Kräfte zu leicht stören. In anderer Weise unbefriedigend ist auch die Rechnung, weil sie für die meisten, beliebigen Leiterformen nicht anwendbar ist (vgl. 58).

Es ist daher sehr wichtig, aus der Anschauung genügend vieler, treffend ermittelter Kraftliniendarstellungen noch weitere, allgemein gültige Sätze über die Kraftlinien — außer den schon angegebenen (68—74) — zu entnehmen (83—85, 415, 421), um danach in jedem beliebigen Falle eine Kraftlinienzeichnung als Darstellung des elektrischen Feldes geben zu können, die, wenn auch nur annähernd richtig, doch alles Wesentliche enthält.

83. Eine sehr wesentliche Eigenschaft der Kraftlinien, die auch viel bereits im einzelnen Entwickeltes zusammenfaßt, kommt bei Ermittelung von Kraftlinienläufen am meisten in Betracht: Sie sind geformt wie gespannte Fäden, die einander seitlich drängen. Das Drängen wird um so wirksamer, die Kraftlinien haben um so größere Abstände von einander, je länger die Strecken sind, auf welchen sie nebeneinander herlaufen.

Man kann hiernach ohne jede Zuhilfenahme von Coulombs Gesetz leicht die Kraftlinienläufe und Verteilungen bei gegebenen Leitern angeben, wie es die folgenden Beispiele zeigen.

In Abb. 78 ist die radiale Gradlinigkeit Folge der möglichsten Kürze der gespannten Fäden und die gleichmäßige Verteilung ist Folge des bei den gleichen Längen überall gleichen gegenseitigen Drängens.

In Abb. 79 würden die Kraftlinien vermöge ihres Zuges alle zur kürzesten Verbindungslinie der beiden Kugeloberflächen zusammengehen; jedoch ihr seitliches Drängen hält sie auseinander, besonders wo sie die langen Umwege machen. Am dichtesten sind sie hiernach zwischen den beiden Kugeln, besonders an deren Oberflächen, wo sie senkrecht enden müssen; dort sind demnach die

stärksten Teile des Feldes. Daß die Kraftlinien nicht ins Innere der Leiter reichen, sondern an deren Oberfläche enden, und zwar senkrecht, dies versteht sich jetzt ohne weiteres aus ihrer möglichsten Verkürzung und aus der Beweglichkeit ihrer Enden — der freien Elektrizitäten — in und an den Leitern, womit auch der Sitz der freien Elektrizitäten ausschließlich an den Leiteroberflächen für alle Leiterformen gegeben ist, ebenso wie daß an hervorragenden Teilen, wie Spitzen, viel Kraftlinien enden müssen, also die Flächendichte groß sein muß.

In Abb. 80 können die Kraftlinien, die von jeder der beiden gleichgeladenen Kugeln — die anfänglich weit getrennt seien — nach außen hin laufen müssen, wie in Abb. 78, beim Zusammenbringen der Kugeln einander nicht schneiden (71), sie müssen daher einander ausweichen und wegen ihres seitlichen Drängens trotz Längszug sich krümmen, wie die Abbildung es zeigt. Am dichtesten enden die Kraftlinien an den Kugeln, wieder dort, wo sie am kürzesten sind, diesmal an den äußeren Seiten, was richtig die Kraftverteilung sowie die ungleichmäßige Verteilung der Elektrizitäten an den Kugeloberflächen angibt. Mitten zwischen den beiden Kugeln ist ein Punkt ohne Kraftlinien, somit ein Nullpunkt der Kraft.

84. Plattenkondensator. — Auch das Feld der beiden entgegengesetzt geladenen, parallelen Platten, Abb. 83, ergibt sich aus den Kraftlinieneigenschaften (besonders 83 mit 70 und 74) von selber. Zwischen den beiden Platten ist der Kraftlinienabstand überall der gleiche und klein, weil die Längen gleich und kurz sind; es ist demnach dort die Feldstärke (67) überall gleich groß: ein „homogenes elektrisches Feld“. Außen laufen nur wenige Kraftlinien herum, wegen des starken Drängens bei den großen Längen. Die meiste Elektrizität sieht man bei dieser Kraftlinienverteilung an den Innenseiten der Platten sitzen. Nähert man die Platten einander bei unveränderter Ladung, so ziehen sich noch einige der äußeren Kraftlinien ins Innere hinein; doch macht dies um so weniger aus, je größer die Platten im Verhältnis zum Abstand sind.

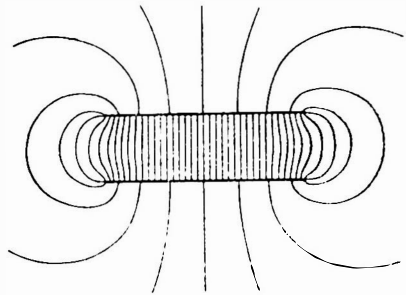


Abb. 83. Plattenkondensator.

Nimmt man die Platten überhaupt sehr groß und nicht allzu weit voneinander an, so hat man das sehr einfache Verhalten des „Plattenkondensators“, daß er nämlich alle Elektrizität an seinen Innenflächen „verdichtet“ und daß dort ein homogenes Feld herrscht, dessen Stärke bei geändertem Plattenabstand unverändert bleibt; letzteres deshalb, weil die Kraftlinienzahl bei ungeänderter Ladung die gleiche bleibt und weil alle Kraftlinien innen sind.

85. Über Bewegungen von Kraftlinien mit und an Leitern. — Man kann fragen, wie die Kraftlinien sich umformen, wenn anfänglich weit voneinander getrennte Leiter, die einzeln den einfach radialen Kraftlinienlauf (wie Abb. 78) haben, einander genähert werden, beispielsweise, wie dann das Kraftlinienbild der benachbarten entgegengesetzt geladenen Leiter (Abb. 79) entsteht. Es kommt dabei ein für die Umgruppierung von Kraftlinien überhaupt wichtiger Satz zur Sprache. Das gegenseitige Drängen der benachbarten Kraftlinien (83) bezieht sich auf den hier vorwiegend zu behandelnden

Fall der Ruhe, wobei stets nur gleichsinnig laufende Kraftlinien (66, 72) nebeneinander vorkommen. Treten bei bewegten Elektrizitäten entgegengesetzt laufende Kraftlinien nebeneinander auf, so erfolgt Umgruppierung in dem Sinne, daß entgegengesetzt laufende Kraftlinien einander nicht drängen, sondern im Gegenteil einander sich nähern, zusammenlaufen und mit verändertem Laufe unter Verkürzung wieder auseinandergehen (vgl. 421).

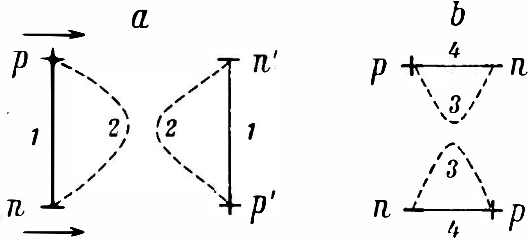


Abb. 84. Umformungen von Kraftlinien.

Es sei dies an der (schematischen) Abb. 84 erläutert. Das Elementarquantenpaar pn mit seiner Kraftlinie 1 (Abb. 84a) nähere sich dem Paar p′ n′, wie es die Pfeile anzeigen. Die Zahlen 1 bis 4 (Abb. 84a und b) geben dann die Formen an, welche die beiden ursprünglichen Kraftlinien 1 der Reihe nach annehmen. Man sieht, daß die Quanten zuletzt (Abb. 84b) umgruppiert sind; es gehören jetzt p und n′, sowie p′ und n zusammen.

Dies zeigt auch, daß zwar die Elementarquanten der beiden Arten paarweise vorhanden sind, daß aber bei ihren Bewegungen an Wechsel der Paarungen zu denken ist.

86. Dies ist auch der Vorgang, der — soweit bekannt — beim „Fließen positiver Elektrizität" in Metalldrähten zu denken ist (vgl. 13, 148): es fließt negative Elektrizität in der entgegengesetzten Richtung, da die positive an den Metallatomen festsitzt und nur eine kurze Strecke weit mit denselben fortzubewegen ist. Die viel beweglicheren, von Atomen losgetrennten

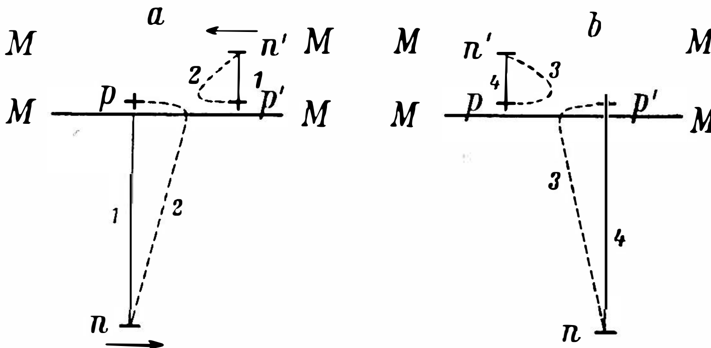


Abb. 85. Gleiten eines positiven Kraftlinienendes an einem Leiter ohne Mitgleiten der positiven Elektrizität.

negativen Elementarquanten (Elektronen) sind dabei durch die ihnen zugehörenden Kraftlinien abwechselnd mit verschiedenen Atomen verbunden, denen Elektronen fehlen und die somit positiven Überschuß haben. So ist in Abb. 85a das Elektron n′ mit p′ im Inneren des Metalles MM durch eine (immer nur sehr kurze) Kraftlinie verbunden. Es werde nun außen ein negativ geladener Körper n, dem die gezeichnete Kraftlinie angehört, in der Pfeilrichtung an der Leiteroberfläche MM vorbeibewegt. Die positive Influenzladung an der Leiteroberfläche, an welcher die von n ausgehenden Kraftlinien enden, muß sich dann mitbewegen. Dies geschieht, wie die

Abb. 85 a und b für eine kurze Zeit der Bewegung zeigen, nicht durch Bewegung dieser positiven Ladung p nach p', sondern durch eine Gegenbewegung des Elektrons n' unter der vorhin betrachteten Umformung der zugehörigen Kraftlinien (85) von 1 zu 2, zu 3, zu 4.

Ist die an der Leiteroberfläche endende Kraftlinie sehr schnell bewegt, z. B. mit Lichtgeschwindigkeit, wie es bei elektrischen Drahtwellen vorkommt (126, 412), so können keinerlei bewegliche Elektrizitäten im Leiter so schnell folgen. Daß trotzdem die volle, den vorbeiziehenden Kraftlinienenden entsprechende Elektrizitätsmenge am oder im Leiter sich mitbewegt, dies wird durch die große Zahl der in guten Leitern vorhandenen beweglichen Elektrizitätsquanten bewirkt. Eine n-fache Zahl derselben in der Raumeinheit bedarf nur 1/n Geschwindigkeit zum Transport der gleichen Elektrizitätsmenge in gleicher Zeit. Die Kraftlinie gleitet dabei an n Elementarquanten des Leiters vorbei, ihre Verbindung mit denselben wechselnd, wie es die Abb. 85 andeutet, während jedes derselben nur 1/n des Weges der Kraftlinie zurücklegt und zwar in gleicher oder in entgegengesetzter Richtung, je nach dem Zeichen des Quants.

Auf Leiter ausgeübte Kräfte.

87. Alle Kräfte im elektrischen Feld durch Zug und Drängen der Kraftlinien bewirkt. — Bringt man einen geladenen Leiter in ein elektrisches Feld, so erfährt er eine Kraft in Richtung der Kraftlinien. Die Größe dieser Kraft ist schon nach der Festsetzung der Feldstärke (64, 65) gegeben als das Produkt aus Ladung des Leiters und Feldstärke. Es kann sein, daß der ins Feld gebrachte Leiter das Feld verändert; aber auch in diesem Falle, wie überhaupt in allen Fällen ist die Frage nach den Kräften, sei es auf freie Elektrizitäten selbst oder auf beliebige geladene oder ungeladene Körper im Felde oder an dessen Grenzen vollkommen durch die Kenntnis der vorhandenen Kraftlinien erledigt.

Denn die *Kraftlinien formen sich nicht nur* — wie wir sahen (83) — *wie gespannte, einander drängende Fäden, sondern sie wirken auch als solche Fäden.*

So ist die Anziehung der beiden entgegengesetzt geladenen Kugeln, Abb. 79, bedingt durch den Zug der sie verbindenden Kraftlinien, ebenso die Abstoßung der gleichnamig geladenen Kugeln, Abb. 80, durch den Zug der von ihnen vorwiegend nach außen gehenden Kraftlinien, und auch die Häufung ruhender Ladung an den Oberflächen der Leiter erscheint als Folge des Zuges der nach außen gehenden Kraftlinien. Auch die Anziehung zwischen dem geladenen und dem ungeladenen, influenzierten Körper, Abb. 81, ist aus den Kraftlinien unmittelbar zu sehen, sowie nicht minder die Anziehung der beiden Kondensatorplatten, Abb. 83.

An die Elektrizitäten und Coulombs Gesetz zu denken ist dabei überflüssig geworden; die Elektrizitäten sind gleichbedeutend mit den Kraftlinienenden und das Gesetz ist enthalten in den Eigenschaften der Kraftlinien.

In Anwendungen wird man bald die Kraftlinien, bald Coulombs Gesetz zur Beurteilung und Berechnung der Kräfte benutzen. So ist beispielsweise in den Fällen der gleich- und der entgegengesetzt geladenen Kugeln eine annähernde Kraftberechnung am schnellsten mittels Coulombs Gesetz möglich, wenn mann die Ladungen in den Mittelpunkten konzentriert denkt; genau richtig ist das nicht. weil die Verteilung der Elektrizitäten an den Kugelflächen ungleichmäßig ist, wie es die Kraftlinien zeigen (Abb. 79, 80); diese Fälle der nicht kleinen Kugeln sind überhaupt nicht einfach. In allen Fällen, die nicht Punktladungen betreffen, z. B. auch im Falle des Plattenkondensators (Abb. 83) wäre die Kraftberechnung nach Coulombs Gesetz notwendigerweise verwickelt, selbst wenn die Ladungs-

verteilung an den Leitern schon gegeben ist. Denn es sind für jedes einzelne Flächenelement des betrachteten, beweglich gedachten Leiters so viele verschieden gerichtete Kräfte zu berücksichtigen als Flächenelemente an den anderen Leitern vorhanden sind. Die Kraftlinien liefern dagegen für jedes Flächenelement des betrachteten Leiters unmittelbar eine einzige Kraft, so daß nur mehr die Resultierende über alle Flächenelemente des betrachteten Leiters zu bilden ist. Letzteres ist oft sehr einfach, besonders z. B. im Falle des Plattenkondensators, wo alle Einzelkräfte parallel und gleich groß sind.

88. Zur Berechnung der Kräfte muß der Zug jeder einzelnen Kraftlinie[1]) bekannt sein. Hierbei ist vor allem zu beachten, daß dieser Zug im allgemeinen auch bei ein und derselben Kraftlinie keineswegs ihrer ganzen Länge nach gleich groß sein kann. Der Zug jeder Kraftlinie muß vielmehr an jeder Stelle der dortigen Feldstärke, also der dortigen Dichte der Kraftlinien proportional sein. Denn die Feldstärke gibt — entsprechend ihrer eigenen Bemessung (64, 65) — die Kraft des Zuges an, welcher auf eine an die betreffende Stelle gebrachte Einheitsladung wirkt, und diese Wirkung wird nur durch die Kraftlinien ausgeübt. Die eigenen Kraftlinien dieser Einheitsladung müssen sich dabei zwischen die Kraftlinien des Feldes einfügen ohne deren Lauf merklich zu ändern; sie müssen daher dasselbe seitliche Drängen und denselben Zug haben wie die benachbarten Kraftlinien des Feldes. Da aber der Zug der Kraftlinien der Einheitsladung eben die Feldstärke bemißt, so muß auch der Zug der übrigen Kraftlinien an der gleichen Stelle der Feldstärke proportional sein, wie behauptet.

Wie groß in bestimmter Krafteinheit der Zug je einer Kraftlinie bei gegebener Feldstärke ist, dies hängt von der Wahl der elektrischen Einheiten ab. Wird in absoluten elektrostatischen CGS-Einheiten (15, 65) gerechnet und ist E die Feldstärke an irgendeiner Stelle, so daß dort E Kraftlinien durchs cm^2 gehen und die Mengeneinheit dort die Kraft E dyn erfährt, so wird diese Kraft von den 4π Kraftlinien ausgeübt, die der Mengeneinheit zugehören (74). Es kommt demnach in absoluten elektrostatischen CGS-Einheiten auf eine Kraftlinie im Felde E die Kraft $E/4\pi$.

Dem Zug in Länge der Kraftlinien ist stets ihr seitliches Drängen proportional. Denn es gilt jede Kraftlinienverteilung, die für einen Fall richtig ist, auch bei beliebiger Vervielfachung der Ladungen der betreffenden Leiter, d. i. bei Vervielfachung der Kraftlinienzahlen und entsprechender Vervielfachung des Zuges jeder einzelnen Kraftlinie. Wäre mit Vervielfachung des Zuges nicht auch das seitliche Drängen ebenso vervielfacht, so würde in allen Fällen gekrümmter Kraftlinien eine Änderung der Verteilung der Kraftlinien eintreten müssen (vgl. 83), beispielsweise in Abb. 79, was aber — entsprechend Coulombs Gesetz — nicht der Fall ist[2]).

[1]) „Zug einer Kraftlinie" hat hier und stets die einfache Bedeutung wie für einen gespannten Faden, als die Kraft, die ihn spannt (nicht die Bedeutung einer auf die Flächeneinheit bezogenen Kraft wie „Zug" und „Druck" in der Mechanik). Zu bemerken ist auch, daß mit der „einzelnen Kraftlinie" stets der Teil des Feldvolums gemeint ist, welcher die betreffende Kraftlinie bis zum halben Abstand der nächsten Kraftlinie röhrenförmig umgibt (vgl. 67).

[2]) Zug und Drängen der Kraftlinien zeigen sich in der Kraftwirkung nicht nur einander proportional, sondern gleich (vgl. 111, 433).

89. Will man die auf Leiteroberflächen wirkenden Kräfte berechnen, so ist zu berücksichtigen, daß die Kraftlinien an diesen Oberflächen enden und daß daher nicht das Feld außerhalb des Leiters, die früher schon betrachtete Normalkraft E_n (73), maßgebend sein kann, sondern nur das bei den Kraftlinienenden, nämlich dort vorhandene Feld, wo die Elektrizitäten sitzen, auf welche die gesuchte Kraft wirkt. Dieses Feld bildet einen Übergang vom äußeren Feld E_n zum Feld Null im Inneren des Leiters, jenseits der Kraftlinienenden. Es ist leicht einzusehen, daß bei gleichmäßiger Verteilung der Oberflächenladung, d. i. der Kraftlinienenden, in einer Schicht von beliebiger Dicke (vgl. 45) $E_n/2$ als durchschnittlich bei den Kraftlinienenden vorhandenes Feld in Betracht käme. Eine einfache Rechnung zeigt weitergehend, daß $E_n/2$ auch für jede beliebige ungleichmäßige Verteilung der Oberflächenladung in ihrer Schicht durchschnittlich gilt[1]). Demnach ist am Sitz der Elektrizitäten an den Leiteroberflächen $E = E_n/2$ zu setzen, und es greift somit für jede am Leiter endende Kraftlinie, welche die Ladung $1/4\pi$ hat (74), bei der Normalkraft E_n die Kraft $E_n/8\pi$ in normaler Richtung am Leiter an.

90. Elektrischer Druck. — Da die Zahl der an der Oberflächeneinheit des Leiters endenden Kraftlinien durch E_n gegeben ist, so ist (89) die auf die Flächeneinheit des Leiters wirkende Kraft $P = E_n^2/8\pi$.

Ist die Flächendichte σ gegeben, so gilt $E_n = 4\pi\sigma$ (75), womit $P = 2\pi\sigma^2$ wird.

Auf die Flächeneinheit bezogene Kraft wird Druck genannt (M 257), und es ist somit P der von innen heraus gerichtete Druck, welchem die geladene Leiteroberfläche vermöge der elektrischen Kräfte unterliegt[2]).

Überall gleich groß, wie der Druck eines Gases, das im Inneren des Leiters wäre, ist dieser Druck nur bei einer freistehenden Kugel, weil hier die Flächendichte σ überall gleich groß ist. An Spitzen muß der Druck wegen der großen Flächendichte immer besonders groß sein; es fliegen infolgedessen dort leicht Oberflächenteile ab: elektrisch geladene Spitzen zerstäuben leicht.

91. Die Gesamtkraft, welche ein geladener Leiter erfährt, ist die Resultierende aller seiner Drucke P.

So berechnet man beispielsweise leicht die Kraft, mit welcher die beiden Platten des Kondensators Abb. 83 (84), zusammengezogen werden. Es seien $+e$ und $-e$ die Ladungen der beiden Platten, f die Flächengröße einer Platte. Es ist dann die Flächendichte $\sigma = e/f$ und das hier überall zwischen den Platten gleiche Feld ist $E = E_n = 4\pi e/f$ (75). Damit wird die Gesamtkraft $K = P \cdot f = 2\pi e^2/f = E^2 f/8\pi$. Bemerkenswert ist die Unabhängigkeit der Kraft vom Plattenabstand. Doch wird dies aus dem Kraftlinienbild, Abb. 83, unmittelbar ersichtlich und es gilt auch nur für den gewöhnlich benutzten Fall sehr großer Platten bei kleinen Abständen, wo alle Kraftlinien zwischen den Platten laufen (vgl. 84).

[1]) Diese Halbierung kann auch aus Coulombs Gesetz hergeleitet werden; man sieht dies unmittelbar aus der unter 73 durchgeführten Überlegung über die auf die Punkte A und B nächst einem kleinen Stück der Leiteroberfläche von diesem und von den übrigen Teilen der Oberfläche ausgeübten Kraft. Noch in anderer Weise ist diese merkwürdige Halbierung mit der Erfahrung verbunden, nämlich durch das Energiegesetz, was später bei der Energieberechnung ersichtlich wird (127).

[2]) Vgl. die frühere Größenangabe für P in einem Beispiel (53).

Man sieht, daß man mittels der Kraft K das elektrische Feld E im Plattenkondensator messen kann; es ist $E = \sqrt{8\pi K/f}$.

Kraftlinien und elektrische Spannung.

92. Spannung aus Dichte und Länge der Kraftlinien ersichtlich. — Da wir Spannung durch Arbeit bemessen haben (30) und diese Produkt aus Kraft und Weg ist, so muß das Kraftlinienbild über alle Fragen der Spannung quantitativ Auskunft geben; denn es läßt Kräfte und Wege unmittelbar ersehen. Wir sahen bereits ein, daß die Wahl des Weges gleichgültig ist (32); es kann daher der Weg längs einer Kraftlinie bevorzugt werden, weil er vereinfachend ist, indem dann Kraft und Weg stets gleiche Richtung haben, wie es für die Berechnung der Arbeit erforderlich ist.

Will man also die Spannung zwischen zwei Leitern finden, so geht man längs einer Kraftlinie, die am einen Leiter anfängt und am andern endet, bildet auf jeder kleinen Strecke das Produkt aus Kraft und Weg und addiert sämtliche Produkte[1]). Führt keine Kraftlinie vom einen Leiter zum anderen, so haben sie auch keine Spannung gegeneinander.

Da die Kraft überall durch die Dichte der Kraftlinien gegeben ist, der Weg durch die Länge, so ist unmittelbar zu sehen, wie Spannung stets nach Dichte und Länge der zwischen den betreffenden Leitern vorhandenen Kraftlinien beurteilbar wird, wobei beide Faktoren, Dichte und Länge, von gleichem Einfluß sind, so daß sie einander ersetzen können.

Betrachtet man beispielsweise die beiden entgegengesetzt geladenen Kugeln, Abb. 79, so sieht man, daß die kürzeste Kraftlinie durch die stärksten Felder führt, jede der längeren Kraftlinien aber durch entsprechend schwächere Felder — ganz entsprechend den Eigenschaften der Kraftlinien (83) —, so daß die Spannung zwischen den Enden jeder Kraftlinie von gleicher Größe sich ergibt, wie es auch sein muß, weil beim Ruhen der Elektrizität jede der beiden Kugeln ihre einheitliche, an allen Oberflächenpunkten gleiche Spannung hat (28). Im Falle der beiden gleichgeladenen Kugeln, Abb. 80, sieht man, daß sie gleiche Spannungen gegen die Umgebung haben müssen, weil ihre Kraftlinien nach Zahl und Form ganz gleich sind. Die beiden Kugeln haben danach gegeneinander keine Spannung (32), was aber auch von selber daraus ersichtlich ist, daß keine Kraftlinien von der einen zur anderen gehen.

93. Spannungsausgleich (Entladung) von Leitern. — Verbindet man Leiter, die Spannung gegeneinander haben, durch einen Draht, so muß vollkommener Umsturz des Feldes stattfinden; es erfolgt Entladung, wie es der ursprünglichen Bedeutung der Spannung entspricht (25). Ruhe kann erst wieder eintreten, wenn beide Leiter samt dem verbindenden Draht gleiche Spannung erhalten haben (28). Der Vorgang besteht darin, daß sämtliche Kraftlinien, deren beide Enden nach Anlegung des Drahts an einem ununterbrochenen Leiter sitzen, vermöge ihres Zuges zu molekularer Kürze sich zusammenziehen,

---

[1]) Nimmt man die Einzelstrecken unendlich klein, so ist eine Summe von unendlich vielen unendlich kleinen Summanden auszurechnen, worauf die Infinitesimalrechnung eingerichtet ist (vgl. als Beispiel ihrer Anwendung Anhang II zur Mechanik). Die Potentialrechnung leitet umgekehrt aus Spannungen die Kräfte her.

indem ihre Enden an den Leiteroberflächen und am Draht entlanggleiten, bis sie zusammenkommen[1]). Dies ist ganz allgemein der Vorgang einer elektrischen Entladung. Wir kommen auf denselben wiederholt und noch eingehender zurück (125, 161). Man versteht daraus, daß die Entladung — der „elektrische Strom" (148) — *jeder beliebigen Krümmung des Leiters* folgt (vgl. auch 124, 125).

94. *Spannungsverteilung im Raum.* — Wir haben „Spannung" eingeführt als das Streben des Fortgehens freier Elektrizität von einem Leiter nach einem andern (25), und bemessen haben wir dieses Streben durch die Arbeitsleistung beim Fortgehen der Mengeneinheit (30). Man kann aber nicht nur Spannungen von Leitern gegeneinander, sondern auch *Spannung zweier beliebiger Raumpunkte* im elektrischen Felde *gegeneinander* ins Auge fassen als das Streben hingebrachter freier Elektrizität, vom einen Punkt zum anderen zu gehen. Das Maß ist dabei wieder die Arbeit, welche beim Übergang der Einheitsmenge vom einen zum anderen Punkte geleistet wird (vgl. dazu 65).

95. *Spannungsgefälle; elektromagnetische Einheit der Feldstärke.* — Es ist nach der so aufgefaßten Spannungsverteilung im Raum bei Kenntnis der Kraftlinieneigenschaften ohne weiteres klar, daß *längs jeder Kraftlinie ein Spannungsgefälle* vorhanden ist, nämlich ein Übergang von der Spannung am einen Ende der Kraftlinie zu der am anderen Ende mit allen Zwischenstufen des ganzen Spannungsunterschiedes der beiden Leiter, an welchen die Kraftlinie sitzt. Die Größe des Spannungsunterschiedes zwischen zwei beliebigen Punkten der Kraftlinie ist immer gegeben durch das Produkt aus Kraft und Weg, d. i. aus Kraftlinien-Dichte und -Länge zwischen den zwei Punkten. Die Größe des Gefälles der Spannung wird definiert als *Quotient aus Spannungsunterschied und zugehöriger Strecke*, wonach man sieht, daß *Spannungsgefälle und elektrische Kraft oder Feldstärke dasselbe* sind. Man kann also elektrische Felder wie Spannungsgefälle in Volt/cm angeben, und dies ist die *elektromagnetische Einheit der Feldstärke*. Es ist 1 Volt/cm = $\frac{1}{300}$ elektrostatische Feldeinheit (vgl. 33), d. h. im Felde von 1 Volt/cm wirkt auf die elektrostatische Mengeneinheit (15) die Kraft $\frac{1}{300}$ dyn.

96. *Flächen gleicher Spannung.* — In Richtungen senkrecht zu den Kraftlinien ist keine Spannung vorhanden, weil keine Kraft vorhanden ist. Man kann durch alle Teile eines beliebigen, gegebenen Feldes Flächen ziehen, die überall senkrecht zu den Kraftlinien stehen und deren jede demnach an allen ihren Punkten überall gleiche Spannung hat. Diese Flächen gleicher Spannung[2]) haben bei ruhender Elektrizität dieselben Formen wie zu den Kraftlinien passende Leiteroberflächen, die ebenfalls überall gleiche Spannung haben und ebenfalls senkrecht zu den Kraftlinien stehen.

Im Beispiel der zwei konzentrischen Kugeln, Abb. 78, sind die Flächen gleicher Spannung ebenfalls konzentrische Kugeln. Bei den zwei gleichnamig geladenen Kugeln, Abb. 80, umgeben diese Flächen die Kugeln in deren Nähe einzeln und in größerer Ferne gemeinsam. Bei den zwei entgegengesetzt geladenen Kugeln, Abb. 79, ist eine der Flächen gleicher Spannung eine Ebene (in der Abbildung gestrichelt).

Würde irgendeine Fläche gleicher Spannung, z. B. die gestrichelte Ebene in Abb. 79, leitend gemacht, so könnte dies an dem ganzen elektrischen Felde nichts ändern; es wären die Kraftlinien zwar im Inneren der leitenden Schicht unterbrochen, aber ihre Enden an den Oberflächen

---

[1]) Wie die Bewegung der positiven Elektrizität am oder im Leiter zu denken ist, haben wir schon erläutert (85, 86).

[2]) Auch „Äquipotentialflächen" genannt.

der Schicht könnten sich nicht verschieben, weil sie schon senkrecht zur Leiteroberfläche stehen. Daraus folgt, daß man in Abb. 79 schon das richtige Kraftlinienbild für den Fall einer geladenen Kugel hat, die einer leitenden Ebene gegenübersteht. Man sieht, daß alle Kraftlinien der Kugel an der (unendlichen) Ebene enden, daß dieselbe also die volle, von der Kugel influenzierte Ladung trägt. Man sieht auch, wie diese Ladung an der Ebene verteilt ist (74) und man sieht, daß die Kraft, mit welcher Kugel und Ebene einander anziehen, gleich der Kraft der beiden Kugeln aufeinander (ohne die Ebene) sein muß, also proportional dem Quadrat der Ladung der Kugel und (bei kleiner Kugel) verkehrt proportional dem Quadrat des Abstandes der Kugel von der Ebene[1]).

Es ist dies ein Beispiel dafür, wie aus dem Kraftlinienbild eines einzelnen Falles die Kraftlinienbilder auch anderer Fälle folgen, was dann auch die vollständige Erledigung dieser Fälle bedeutet.

97. Tropfsammler, Flammensammler. — Man kann die Spannung irgendeines Raumpunktes gegen Erde auch am Elektroskop oder Elektrometer meßbar machen, wozu die „Sammler" („Kollektoren") dienen.

Der Tropfsammler ist ein isoliert aufgestelltes, mit Spannungsmesser verbundenes Wassergefäß mit (langem, dünnem) Ausflußrohr. Man stellt dasselbe so hin, daß der ausfließende Wasserstrahl an dem Punkte des Feldes in Tropfen zerfällt, dessen Spannung gemessen werden soll. Ist der Strahl eine Weile gelaufen, so hat er samt dem ganzen Gefäß die Spannung eben dieses Punktes des Tropfenzerfalles angenommen, die somit an dem mit dem Gefäße leitend verbundenen Spannungsmesser gegen Erde (35) abgelesen werden kann.

Dieser Erfolg ist leicht zu verstehen. Hat nämlich der Wasserstrahl ursprünglich andere Spannung als seine Umgebung, so laufen aus dieser Kraftlinien nach dem Strahl, wie zwischen irgendwelchen Punkten verschiedener Spannung stets Kraftlinien laufen (92). Die an dem Zerfallsort des Strahles endenden Kraftlinien werden aber von den abfallenden Tropfen mitgenommen, weil die Tropfen isoliert sind, wonach kein Kraftlinienende sie verlassen kann. Die an der Abfallstelle endenden Kraftlinien werden somit fortwährend aus dem Felde entfernt, solange, bis keine mehr an dieser Stelle enden, d. h. eben bis diese Stelle die Spannung ihrer Umgebung angenommen hat.

Statt des Wasserstrahles kann man auch eine (kleine) Flamme nehmen, die aus isolierter, mit Spannungsmesser verbundener Öllampe brennt („Flammensammler"). Es ersetzen hierbei die von der Flammenspitze sich ablösenden, leitenden Gasmassen (4) die Tropfen des Wasserstrahls, und der Spannungsmesser gibt dann die Spannung des Ortes der Flammenspitze gegen Erde an.

Man kann mit den Sammlern elektrische Felder messen. Man ermittelt dazu die Spannung an zwei benachbarten, auf derselben Kraftlinie liegenden Punkten des Feldes und dividiert den Unterschied durch den Abstand der beiden Punkte; sind die Spannungen in Volt, der Abstand in cm gemessen, so erhält man die Feldstärke in Volt/cm (95).

98. Erdspannungsgefälle. — Mit dem Tropfsammler oder Flammensammler ist auch das elektrische Feld um die Erdkugel leicht meßbar. Hebt man bei klarem Himmel auf freiem Felde in ebener Gegend die Flamme des Sammlers an isolierendem Stiele auf einige m Höhe über den Erdboden, so zeigt das mit dem Sammler verbundene Elektroskop einige 100 Volt Spannung an. Die Feldstärke ist also, da das Elektroskop Spannung gegen den Erdboden mißt, rund 100 Volt/m. Dies ist das normale („Schönwetter"-) Erdspannungsgefälle. Das Elektroskop divergiert dabei mit positiver Ladung, was bedeutet, daß die Erdoberfläche negative Ladung trägt.

Die von der Erde demnach ausgehenden Kraftlinien laufen radial weg, wie von der Kugel in Abb. 78; es könnte sein, daß sie bis zu anderen Himmelskörpern laufen, die dann die positive Ladung trügen. Man findet aber bei Luftfahrten, daß das Spannungsgefälle mit zunehmender Höhe über dem Erdboden ziemlich schnell gegen Null sinkt; schon in 4 km Höhe ist nur mehr etwa $1/_{10}$ des unteren Spannungsgefälles vorhanden. Daraus folgt, daß die der negativen Erdladung gleiche positive Ladung in der Luft sitzt; die von der Erdoberfläche ausgehenden Kraft-

[1]) In optischer Analogie kann man die hier, bei Betrachtung der Kugel an der Ebene, zur Hilfe genommene zweite Kugel das „elektrische Bild" der ersten in der Ebene nennen. Kennt man das Bild, so kennt man die ganze Wirkung der Ebene. Das elektrische Bild stimmt hier mit dem optischen Bild überein, das die Ebene als Spiegel von der Kugel gäbe; doch ist solche Übereinstimmung nicht der allgemeine Fall.

linien enden an positiv geladenen Elektrizitätsträgern (503), die in der Atmosphäre verteilt sind. Dies ist der normale elektrische Zustand der Erdatmosphäre.

Bei Gewittern kommen, wie die Blitze zeigen, außerordentlich viel stärkere Felder zwischen Wolke und Erde und auch zwischen Wolken untereinander vor.

99. „Spannung" ohne Kraftlinien ist nichts. — Wir kommen hier darauf zurück, daß niemals Spannung an sich, sondern immer nur Spannungsunterschied Bedeutung hat (31), was auch in allen Meßweisen von Spannung zur Geltung kommt (34 u. f., 100). Spannungsunterschiede von Leitern, sowie Spannungsgefälle im Raum sind aber immer an das Vorhandensein von Kraftlinien gebunden (95); somit sind die Kraftlinien immer das Wesentliche auch bei und für Spannung. Wo keine Kraftlinien sind, sind auch keine Spannungserscheinungen. Man nehme einen von elektrisch geladenen, leitenden Wänden ganz umschlossenen Hohlraum und beachte die Spannung in dessen Inneren. Sie ist an allen Punkten dieses Inneren ebenso groß wie an der leitenden Oberfläche; denn kein Gegenstand im Inneren gibt Zeichen von Spannungsunterschieden gegen die Wände, entsprechend dem Fehlen von Kraftlinien im Inneren. Schon der Versuch der Abb. 73 (41, 42) zeigte dies; die Spannungserscheinungen finden sich nur außen, wo Spannungsgefälle und wo die Kraftlinien sind. Faraday hat diesen Versuch in besonders umfassender Weise mit einem großen, isoliert aufgestellten und andauernd unter Ladung gehaltenen Hohlraum ausgeführt (1837), in welchem er leben und beliebig experimentieren konnte, ohne das mindeste Zeichen eines Einflusses der hohen Spannung auf Lebendes wie Totes zu bemerken, während außen lange Funken und Büschel dem Käfig entwichen.

Hier ist ein Unterschied zu bemerken zwischen Spannung und dem ihr in Vielem analogen Druck, z. B. Gasdruck (29). Druck hat einen absoluten Nullpunkt, nämlich im Vakuum, wo keine drückenden Moleküle sind. Für eine absolute Spannung Null gibt es aber kein Kennzeichen, weil Spannung an sich überhaupt nichts ist. Man kann für Rechnungen einen Nullpunkt der Spannung willkürlich wählen; die Wahl ist aber ganz gleichgültig und für alle Schlüsse einflußlos.

100. Absolute Messung hoher Spannungen. — Um die Spannungen, welche bestimmten Funkenlängen oder Ausschlägen von Elektroskopen entsprechen, in absoluten elektrostatischen Einheiten oder auch in Volt zu messen, benutzt man den Plattenkondensator. Wir haben dessen Feld (Abb. 83) mit den zugehörigen Größen schon betrachtet (84, 91). Es seien wieder $+e$ und $-e$ die Ladungen der beiden Platten, a ihr Abstand voneinander, f die Fläche einer Platte, E das Feld zwischen beiden, K die Kraft mit der sie einander anziehen. Die Spannung V zwischen den beiden Platten ist dann, als Arbeit, $V = E \cdot a$, oder, da wir $E = \sqrt{8\pi K/f}$ fanden (91), $V = a\sqrt{8\pi K/f}$. Wird K in dyn, a in cm und f in cm^2 gemessen, so erhält man V in absoluten elektrostatischen CGS-Einheiten, oder bei Hinzufügung des Faktors 300 in Volt (33).

Um die Gleichungen genau gelten zu lassen, müssen die Randteile der Platten, die nicht das einfache, homogene Feld haben, ausgeschaltet sein. Man erreicht dies, indem man nur einen mittleren Teil der einen (oberen) Platte zur Kraftmessung beweglich macht; ein engster Zwischenraum trennt diesen Teil ohne Störung des Feldes von dem in gleicher Ebene liegenden Randteil, der ihn als „Schutzring" umgibt. Dieser bewegliche Teil kann zur Kraftmessung als Waagschale ausgebildet sein („elektrische Waage", „absolutes Elektrometer").

101. Kapazität neu betrachtet. — Wir haben die elektrische Kapazität eines Leiters (47) als in erster Linie durch die Größe seiner Oberfläche gegeben betrachtet, zugleich aber auch bereits gesehen, daß sie durch seine Umgebung wesentlich beeinflußt wird (48). Jetzt, nach Kenntnis der Kraftlinien und voller Erläuterung der Bedeutung der Spannung, muß klar werden, daß Kapazität überhaupt nicht einem einzelnen bestimmten Leiter zugehören kann, sondern nur einem bestimmten elektrischen Felde, das allerdings zum Leiter gehört, aber doch in dessen Umgebung seinen Sitz hat. Denn Kapazität ist festgelegt als das Verhältnis Elektrizitätsmenge/Spannung (47), und Spannung bezieht sich stets auf zwei Punkte oder Leiter gegeneinander (31); somit kann auch Kapazität stets nur auf das Leiterpaar sich beziehen, zwischen welchem die Spannung gilt und zwischen welchem das elektrische Feld sitzt, nämlich auf den Leiter, der die Elektrizitätsmenge aufnimmt und auf den anderen Leiter, an welchem die von dieser Menge ausgehenden Kraftlinien enden. Kapazität sitzt also stets zwischen zwei Leitern oder an dem einen, betrachteten Leiter samt seiner Umgebung bis zu jenem anderen Leiter hin, wo die vom ersteren ausgehenden Kraftlinien enden; sie sitzt also, da das Innere des Leiters unbeteiligt ist, überhaupt in der Umgebung, im elektrischen Felde des betrachteten Leiters.

Wenn von der Kapazität eines einzelnen Leiters die Rede ist, z. B. von der Kapazität einer Kugel, so hat das immer etwas Unbestimmtes, sofern nicht klar ist, welche Umgebung die Kugel haben soll. Die Umgebung, welche gewöhnlich, wenn nichts weiter gesagt wird, zu denken ist, z. B. wenn die Kapazität einer Kugel in absolutem elektrostatischen Maße gleich ihrem Radius angegeben wird (56), ist der unendliche, freie Raum; die Kugel soll also allein in der Welt sein. Man sieht, daß hierbei ein gar nicht genau zu verwirklichender Zustand gedacht wird; man kann, wenn man eine solche Angabe benutzen will, nur dafür sorgen, daß die Kraftlinien der Kugel ungestört radial weiterlaufen bis in Entfernungen, wo dann das Feld so schwach wird, daß es für die Spannung und also auch für die Kapazität nicht wesentlich weiter darauf ankommt, wo sie enden. Es ist klar, daß dies nur bei großer Vorsicht innerhalb bestimmter Genauigkeitsgrenzen zu verwirklichen ist.

Wohlbestimmte Kapazitäten müssen beide Leiter in sich fassen, an welchen die Kraftlinien anfangen und enden, und es sollen möglichst keine Kraftlinien nach außen kommen, deren Lauf dann unbestimmt wäre.

Diese Bedingungen werden von den zwei konzentrischen Kugeln (Abb. 78, 68) gut erfüllt („Kugelkondensator“), deren Feld ganz innerhalb der größeren Kugel ist, so daß kein außen befindlicher Gegenstand Einfluß haben kann. Ein Übelstand ist nur, daß die innere Kugel eine Zuleitung bekommen muß, die auch in Gestalt eines dünnen, durch ein Loch der äußeren Kugel gehenden Stieles den einfachen Lauf der Kraftlinien etwas stört.

Noch besser ist daher der Plattenkondensator (Abb. 83, 84), dessen Feld so gut wie ganz zwischen den Platten verläuft, wenn deren Abstand genügend klein gemacht wird. Seine Kapazität läßt sich leicht aus den Abmessungen berechnen. Die Spannung ist mit den schon benutzten Bezeichnungen (100) $V = Ea$, oder, da das Feld $E = 4\pi e/f$ (91), $V = 4\pi ea/f$. Die Kapazität $C = e/V$ ist demnach

$$C = f/4\pi a \qquad 101)$$

Man sieht, daß große Oberfläche f auch hier wieder große Kapazität gibt, außerdem aber daß Verkleinerung des Abstandes a im selben Sinne wirkt (vgl. die Versuche 103).

Die Gl. 101 gibt die Kapazität in absoluten elektrostatischen CGS-Einheiten, wenn die Fläche f in cm^2 und der Abstand a in cm eingesetzt wird; um sie in Farad zu erhalten, muß der Faktor $1{\cdot}11{\cdot}10^{-12}$ hinzugefügt werden (50).

102. Kapazitätsnormalen (Normalkondensatoren). — In Gestalt von Plattenkondensatoren macht man auch aufbewahrbare Kapazitäten von bekannter Größe. Die Berechnung der Größe erfolgt nach Gl. 101 aus Messungen von f und a[1]). Mit solchen berechenbaren Kondensatoren werden auch andere, von nicht genügend einfacher Gestalt, durch Vergleichung geeicht. Letzteres erfolgt — wie Kapazitätsmessung überhaupt — durch Spannungsmessung, indem man die auf gemessene Spannung geladene bekannte Kapazität in die unbekannte entlädt und die dabei gesunkene Spannung mißt. Es verhält sich dann (nach Gl. 47) die bekannte Kapazität zur Summe der beiden Kapazitäten wie die letztere Spannung zur Anfangsspannung.

103. Mit einem einfachen Plattenkondensator und einem Elektroskop können folgende Versuche ausgeführt werden, die das im Vorstehenden Überlegte erläutern (Abb. 86). Die untere Platte u ist am Elektroskop, die obere o kann unisoliert in der Hand gehalten oder besser durch einen Draht mit dem Elektroskopgehäuse (35) verbunden werden. Das Elektroskop muß dann richtig stets die Spannung zwischen den beiden Platten anzeigen.

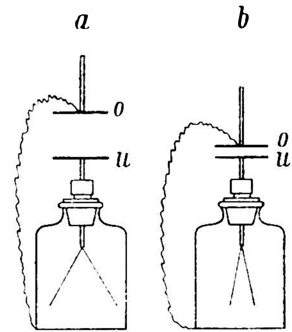


Abb. 86. Kapazitätsänderung durch Abstandsänderung.

Hat man u bis zu guter Divergenz des Elektroskops aufgeladen, während o noch beiseite gelegt ist, und nähert man dann o (oder auch die Hand) von oben, wie es Abb. 86a und b zeigen, so sinkt die Divergenz merklich, zum Zeichen, daß die am Elektroskop befindliche Kapazität bei dieser Annäherung gewachsen ist; denn die Elektrizitätsmenge bleibt (bei guter Isolation) konstant. Dies zeigt den Einfluß der Umgebung auf die Kapazität von u und die vorher erörterte Unbestimmtheit der Kapazität eines freistehenden Leiters (101).

Verschiebt man o noch weiter nach unten, so daß der Abstand der Platten äußerst klein wird, so steigt die Kapazität so sehr, daß die Divergenz am Elektroskop fast verschwindet; Hebung von o bringt aber wieder die alte Divergenz hervor. Dies zeigt den Einfluß des Abstandes der Platten auf die Kapazität, entsprechend Gl. 101. Um bei sehr kleinem Plattenabstand Berührung der beiden Platten und dadurch Entladung zu vermeiden, legt man ein dünnes Glimmerblatt auf die untere Platte und setzt dann die obere darauf. Die erst stark divergierenden Blätter des Elektroskops sinken dabei vollkommen zusammen, als hätte Entladung stattgefunden; es ist aber nur die Kapazität so groß geworden und die Spannung infolgedessen so gesunken, daß das Elektroskop sie nicht mehr nachweisen kann. Zum Zeichen, daß es wirklich keine Entladung

---

[1]) Den in Gl. 101 nicht einbegriffenen Randverlauf des Feldes kann man durch einen Schutzring (100) vermeiden. Es sind aber auch Korrektionen für den Randverlauf berechnet; sie werden um so unbedeutender, je größer f/a ist.

war, hebt man die obere Platte wieder ab; die starke Divergenz kehrt dann wieder.

Man kann die Platte o auch isoliert abheben und dann ihre der unteren Platte entgegengesetzt gleiche Ladung an einem zweiten Elektroskope zeigen. Die beiden Elektrizitäten haben sich während der großen Nähe der Platten „gebunden" gehalten (vgl. 8, 20), was wir jetzt nicht mehr so sehr nach Coulombs Gesetz als vielmehr nach dem Kraftlinienbilde, als Folge des Zuges der Kraftlinien beurteilen; die Kürze der Kraftlinien bedeutet dabei die kleine Spannung (92).

Neue Erfahrungen.

An dieser Stelle, bei Betrachtung der Kapazitäten, hat sich eine neuartige, über Coulombs Gesetz in dessen ursprünglicher Fassung (14) hinausgehende Erkenntnis gezeigt: Die Kräfte von Elektrizitäten aufeinander hängen nicht nur von deren Mengen und Abstand ab, sondern auch vom Stoff, der den Raum zwischen den Elektrizitäten erfüllt. In diesem Zwischenraum laufen aber die Kraftlinien, und man sieht also wieder, daß es auf die Kraftlinien ankommt.

104. Einfluß des Stoffes im elektrischen Feld auf die Kapazität. — Ist der Zwischenraum von Kondensatorplatten statt mit Luft mit einem anderen Isolator erfüllt, wie beispielsweise beim letztbeschriebenen Versuche mit Glimmer (103), so ist die Kapazität verändert und zwar vergrößert (Cavendish, Faraday). Man zeigt dies, indem man bei mäßigem Abstand der Platten, etwa wie in Abb. 86b, die Luft durch eine seitlich einzuschiebende Platte aus irgendeinem isolierenden Stoff ersetzt: die Divergenz sinkt beim Einschieben der Platte, am meisten wenn sie dick genug ist, um den ganzen Zwischenraum auszufüllen. Beim Herausziehen der Platte kehrt die größere Divergenz wieder.

Demnach ist Kapazität, die wir schon ganz im elektrischen Felde sitzend sahen (101), überhaupt nur durch Form und Stoff des elektrischen Feldes bestimmt; die Leiter spielen nur als Begrenzungen des Feldes eine Rolle; ihr Stoff ist gleichgültig.

105. Dielektrikum.— Man nennt einen Stoff in dieser seiner neuartigen Wirksamkeit — nicht so sehr das Fortgehen der Elektrizitäten verhindernd, in welcher Eigenschaft er Isolator heißt, sondern die Kraftlinien und deren Kräfte beeinflussend — „Dielektrikum".

106. Dielektrizitätskonstante. — Alle isolierenden Stoffe zeigen diese kapazitätsvermehrende Eigenschaft, wirken also als Dielektriken, doch nicht alle gleich gut. Das Maß für diese Wirksamkeit wird „Dielektrizitätskonstante" des Stoffes genannt; sie gibt an, wieviel mal so groß die Kapazität eines Kondensators wird, wenn seine Kraftlinien in dem Stoffe statt im Vakuum laufen. Die Dielektrizitätskonstante des Vakuums, des bloßen Äthers, ist demnach 1 (vgl. Tab. 41). Man ermittelt die Dielektrizitätskonstanten durch Kapazitätsmessungen (102). Luft und andere Gase, mit Vakuum verglichen, geben nur einen kleinen Unterschied, wie es die nur wenig über 1 gehenden Dielektrizitätskonstanten zeigen, und in diesem Sinne konnten wir bisher und können wir auch ferner vom Luftraum für Kraftlinien so gut wie vom leeren Raum — bloßen Äther — reden. Flintglas hat eine hohe Dielektrizitätskonstante. Die

noch viel höheren Konstanten von Alkohol und Wasser können wegen deren schlechter Isolation nur bei äußerst kurzen Ladungszeiten, d. i. mit rasch wechselnden Ladungen (elektrischen Schwingungen) oder sonst in anderer Weise gemessen werden, was später zu betrachten ist (397, 109). Kristalle haben in verschiedenen Richtungen verschiedene (teils auch sehr hohe) Dielektrizitätskonstanten.

Tab. 41. **Dielektrizitätskonstanten.**

Vakuum	1
Luft	1·0006
Kohlensäure	1·0009
Schellack	2
Schwefel	4
Flintglas	8
Schwefelkohlenstoff	2·6
Alkohol	25
Wasser	80

Die Beispiele der Tabelle zeigen, daß die Dielektrizitätskonstante nichts mit Isolierfähigkeit zu tun hat. So schlechte Isolatoren wie Wasser und Alkohol sind sehr gute Dielektriken; die gut isolierenden Gase sind dielektrisch fast unwirksam, wogegen wieder das gut isolierende Flintglas ein gutes Dielektrikum ist. Es sind offenbar zwei ganz verschiedene Beanspruchungen eines und desselben Stoffes: als Isolator und als Dielektrikum.

Wir werden die Dielektrizitätskonstante stets mit ε bezeichnen.

107. Zug und seitliches Drängen der Kraftlinien im Dielektrikum vermindert. — Die Vermehrung der Kapazität aufs εfache bei Erfüllung des elektrischen Feldes mit dem Dielektrikum der Konstante ε, das Sinken der Spannung bei unveränderter Elektrizitätsmenge auf $1/\varepsilon$, bedeutet die Verminderung des Zuges jeder Kraftlinie auf $1/\varepsilon$. Denn die Spannung wird durch Arbeit = Kraft · Weg bemessen, und der Weg von Platte zu Platte ist unverändert geblieben; also muß die Kraft gesunken sein, und weil die Zahl der Kraftlinien (74) bei der ungeänderten Elektrizitätsmenge gleich geblieben ist[1]), muß der Zug jeder einzelnen Kraftlinie auf $1/\varepsilon$ gesunken sein (vgl. 113).

108. Kräfte bei konstanter Ladung. — Unmittelbarer noch kann die Verminderung des Kraftlinienzuges mittels der elektrischen Waage (100) ge-

[1]) Es ist keine willkürliche, sondern eine durch die Natur der Dinge (72) gegebene Festsetzung, die wir hier folgerichtig durchführen: Daß mit jeder Elektrizitätsmenge eine festbestimmte, ihr proportionale Zahl von Kraftlinien verbunden ist und unter allen Umständen verbunden bleibt. Denn die Kraftlinien und die Elektrizitäten haben sich beide durch alle Erfahrung als das wesentlich den Erscheinungen Zugrundeliegende gezeigt und zwar stets in Verknüpfung miteinander. Nach dieser Erkenntnis muß sich eine naturgemäße Darstellung richten. Andersartige Festsetzungen, etwa auch unter Einführung besonderer Linien für den Fall des Vorhandenseins eines Dielektrikums, sind durch Vorstellungen aus früherer Zeit bedingt, da man des Bestehens der Elektrizitäten nicht sicher war; sie sind nach heutiger Kenntnis willkürlich und bedeuten in der Tat unnötige Verwickelungen. Es entspricht sowohl der vorhandenen Kenntnis als auch unserem Streben nach möglichster Vereinfachung und Vereinheitlichung der Darstellung, daß wir von dem in mathematischen Abhandlungen gewohnten Wege hier abweichen. Die gute, einfache Durchführbarkeit unserer Darstellungsweise zeigt sich durch alles weitere bis ans Ende der Elektrizitätslehre bewährt (vgl. 254, auch Note zu 72 und Anhang E V a, 1, Bd. IV).

zeigt werden. Man versetzt beide horizontalen Platten eines Kondensators in eine Glasschale und läßt die obere an einer Waage hängen, um die Kräfte zwischen den Platten unmittelbar messen zu können. Ist dann die Schale erst leer (lufterfüllt) und die Kraft ausgewogen, und füllt man dann die Schale bis über die obere Platte bei unveränderter Ladung des Kondensators mit dem gut isolierenden Schwefelkohlenstoff, so findet man dann die Kraft[1]) auf $1/\varepsilon$ (1/2·6 nach Tab. 41) gesunken[2]).

Dies zeigt auch unmittelbar, daß der Druck P an Leiteroberflächen, oder der Gesamtzug der Kraftlinien an 1 cm² dieser Oberflächen, den wir in Luft (Vakuum) $P = E_n^2/8\pi = 2\pi\sigma^2$ fanden (90), für den allgemeinen Fall der Grenzfläche eines iters gegen ein Dielektrikum die Größe $E_n^2/8\pi\varepsilon = 2\pi\sigma^2/\varepsilon$ hat, wobei E_n stets das normal zur Leiteroberfläche gerichtete Feld ist, wie es ohne Vorhandensein des Dielektrikums bei der Flächendichte σ am Leiter zu finden wäre. Setzt man das tatsächlich im Dielektrikum vorhandene Feld $E = E_n/\varepsilon$ ein, so wird der Druck $E^2\varepsilon/8\pi$.

Es ist nun auch klar, daß Coulombs Gesetz in der bisher benutzten Form (14, Abb. 66) nur für das Vakuum gelten kann und daß für die Raumerfüllung mit einem Dielektrikum der Konstante ε die Kraft zwischen zwei ruhenden Elektrizitätsmengen e_1 und e_2 im Abstande r von einander auch auf $1/\varepsilon$ vermindert sein und daher durch $\frac{e_1 e_2}{r^2} \cdot \frac{1}{\varepsilon}$ gegeben sein muß.

109. Kräfte bei konstanter Spannung. — Sind nicht die Ladungen der Leiter und somit ihre Flächendichten konstant, wie wir es beim eben gedachten Versuch mit dem Plattenkondensator in der Glasschale voraussetzten (108), sondern werden die Leiter auf konstanter Spannung gehalten, so sind die Kräfte im Dielektrikum, verglichen mit denen in Luft, nicht erniedrigt, sondern aufs ε-fache erhöht. Denn es ist die Kapazität, und damit bei der konstanten Spannung die Ladung und also die Flächendichte aufs ε-fache erhöht, und die Kräfte P sind dem Quadrat der Flächendichte proportional (108). In dieser Weise kann man die Dielektrizitätskonstanten auch schlechter Isolatoren, wie Wasser und Alkohol, mittels Kraftmessung bestimmen, wenn eine reiche Elektrizitätsquelle zur Verfügung steht, welche die Isolationsverluste ersetzt und damit die Aufrechterhaltung konstanter Spannung ermöglicht.

110. Elektrisches Feld im Dielektrikum. — Das elektrische Feld hat im Inneren eines Dielektrikums dieselbe Bedeutung wie im Vakuum (65), und es ist daher auch seine Messung in derselben Weise zu denken, nämlich durch die auf die Einheitsladung ausgeübte Kraft. Da diese Kraft, wie wir sahen, bei gleichen Ladungen an den Leitern, also auch gleicher Kraftlinienzahl, auf $1/\varepsilon$ erniedrigt ist im Vergleich zum Vakuum (107), so ist auch das Feld im Dielektrikum auf $1/\varepsilon$ erniedrigt. Ist also σ die Flächendichte an einem im Dielektrikum befindlichen Leiter, so gilt für das Feld E_n nächst seiner Oberfläche, welches im Vakuum $4\pi\sigma$ wäre (75),

$$E_n = \frac{4\pi\sigma}{\varepsilon} \,. \qquad 110)$$

111. Der Kraftlinienlauf bei teilweiser Erfüllung des Feldes mit dielektrischen Körpern ergibt sich aus der stets, auch im Dielektrikum, geltenden Gleichheit von Zug und seitlichem Drängen (88) der Kraftlinien. Es ist mit dem im Dielektrikum auf $1/\varepsilon$ verminderten Zug auch ein auf $1/\varepsilon$ vermindertes Drängen verbunden.

---

[1]) Selbstverständlich bei Berücksichtigung des Auftriebes der oberen Platte.

[2]) Wie die Kraftmessung in einem festen Dielektrikum nach Definition ausführbar wäre, dies erklären wir im ganz gleichen Falle der magnetischen Kraft in Eisen (253).

Es sei eine Kugel, z. B. aus Schellack oder Schwefel, in ein homogenes elektrisches Feld (84) gebracht, dessen Kraftlinien (Abb. 87) ohne Anwesenheit der Kugel gradlinig parallel und mit gleichen Abständen laufen würden wie es käme, wenn rechts und links etwas außer dem Zeichnungsfeld der Abbildung vertikale, geladene Kondensatorplatten, senkrecht zu den Kraftlinien stehend, vorhanden wären. Es stellt sich dann beim Einbringen der Kugel der in der Abbildung gezeichnete Kraftlinienlauf ein. Die Kraftlinien werden infolge des im Dielektrikum verminderten seitlichen Drängens von außen, wo das Drängen größer ist, in die Kugel seitlich hereingedrängt, bis neues Gleichgewicht erreicht ist. Dabei werden die Kraftlinien außen entgegen ihrem Zuge gekrümmt. Der Herantritt der Kraftlinien ans Dielektrikum erfolgt im allgemeinen schief zur Grenzfläche, nicht senkrecht wie an einem Leiter. Die Verdichtung der Kraftlinien im Dielektrikum ist um so stärker und das Herangehen der Kraftlinien um so näher senkrecht, je größer die Dielektrizitätskonstante ist.

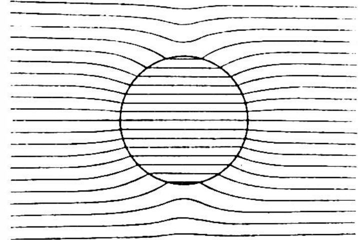


Abb. 87. Dielektrische Kugel in homogenem elektrischem Feld.

Die Richtigkeit des erläuterten Kraftlinienlaufes und damit auch die **Gleichheit von Zug und Drängen** ist prüfbar durch Folgerungen, auch quantitativer Art, besonders Kraftwirkungen betreffend, die man aus dem Laufe zieht (112). Im ganz gleichen, später zu behandelnden Falle der magnetischen Kraftlinien kann der äußere Lauf auch mittels Eisenfeile leicht gesehen werden (vgl. z. B. Abb. 13 Bd. IV, welche einen Eisenring in nahe homogenem Magnetfeld darstellt).

112. Auf Nichtleiter ausgeübte Kräfte. — Es kann auf das Vorhandensein solcher Kräfte stets leicht aus dem soeben untersuchten Kraftlinienlauf um das Dielektrikum (111) geschlossen werden.

Für Schlüsse qualitativer und schätzungsweise quantitativer Art kann die Eigenart des Kraftlinienlaufs auch durch die Vorstellung festgehalten werden, daß die Kraftlinien wie **Strömungslinien einer Flüssigkeit** (M 389) sich formen, die im Dielektrikum einen der Dielektrizitätskonstante entsprechend verminderten Widerstand ihres Fließens findet. Die Flüssigkeit wird dann den Weg durchs Dielektrikum vorziehen und Umwege machen, um möglichst in diesen Raum geringeren Widerstandes zu gelangen. Man kann auch sagen: das Dielektrikum ist ein Raum, welcher **der Ausbildung von Kraftlinien günstiger ist**, so daß sie dorthin sich konzentrieren.

Zu Schlüssen auf Kraftwirkungen unmittelbar brauchbar ist auch die Aussage: Das Dielektrikum **zieht die Kraftlinien der Umgebung in sich**, und ebenso ziehen Kraftlinien das Dielektrikum zu sich, so daß es im elektrischen Felde **dorthin sich begibt, wo die meisten Kraftlinien sind**. Es wird danach ein dielektrischer Körper im inhomogenen elektrischen Feld stets eine **Kraft** erfahren, **die nach den stärkeren Teilen des Feldes gerichtet ist**. Auf die Kugel im homogenen Feld, Abb. 87, wird demnach gar keine Kraft wirken; in inhomogenem Felde wird sie dorthin getrieben, wohin die sie umgebenden Kraftlinien konvergieren. Es wird also eine dielektrische Kugel von

einer elektrisch geladenen Kugel angezogen, fast wie ein Leiter angezogen würde, nur schwächer. Man kann dies mit einer Schwefelkugel, die wegen ihrer guten Isolation nicht durch Leitung täuschen kann[1]), gut nachweisen. Der Kraftlinienlauf gestaltet sich hierbei in der Tat wie bei der isolierten leitenden Kugel (B), die wir in Abb. 81 betrachteten. Der Unterschied ist nur, daß der dielektrische Körper die Kraftlinien weniger zu sich hinzieht als die Leiterkugel[2]), weshalb er auch weniger ins starke Kraftfeld hineingezogen wird, und daß beim Leiter innen keine Kraftlinien sind, während beim Dielektrikum die ein- und austretenden Kraftlinien innen verbunden sind durch Kraftlinien, die einen Gegenzug ausüben, woraus wieder die im Vergleich zum Leiter verminderte Kraftwirkung zu sehen ist.

Ein dielektrisches Ellipsoid in homogenem elektrischen Feld würde ein Drehmoment erfahren und mit der großen Achse in Feldrichtung sich stellen, weil so die Kraftlinien den günstigen Lauf im Dielektrikum in größter Länge erhalten. In dieser Weise können kleine, nicht kugelige Partikel dielektrischen Stoffes auch als Kraftlinienzeiger dienen, ähnlich den früher betrachteten Leiterstücken (82).

Zur Berechnung der Größe von Kräften wendet man sich meist am besten an die Energie, worauf wir später eingehen (128).

113. Vorgänge im Inneren des Dielektrikums. — Man kann die erörterte, durch ein Dielektrikum bewirkte Beeinflussung der Kraftlinien eines Feldes auch durch Betrachtung des Mitwirkens der eigenen elektrischen Felder der Moleküle des Dielektrikums verstehen. Es werden die den Molekülen eigenen Elektrizitäten von den Kraftlinien des Feldes ergriffen werden und sie erleiden dadurch kleine Verschiebungen. Es sind das die von uns bereits früher betrachteten „dielektrischen Verschiebungen" (17). Bei guter Isolationsfähigkeit des Stoffes bleiben diese Verschiebungen innerhalb molekularer Abstände; sie haben das Ergebnis, daß den Molekülen eigene, positive Elektrizität nach der einen, negative nach der anderen Seite hin in Richtung der von außen hereingekommenen Kraftlinien verschoben ist. Dies hat den Erfolg, daß das Dielektrikum nun ein eigenes, geordnetes Kraftfeld in seinem Inneren besitzt, während vorher die molekularen Kraftfelder ungeordnet und daher ohne gemeinsame, über die eigene Nachbarschaft hinausgehende Wirkung waren. Dieses geordnete Kraftfeld der dielektrischen Verschiebungen ist aber im ganzen Inneren des Dielektrikums dem Feld der äußeren Kraftlinien, welche die Verschiebungen bewirkten, entgegengesetzt gerichtet. Das innere Feld besteht nämlich aus der Übereinanderlagerung unzähliger Felder — im wesentlichen von der Beschaffenheit des in Abb. 79 dargestellten, eines „elektrischen Doppelpunktes" —, deren stärkste und also in der Übereinanderlagerung überwiegende Teile (rings um die Mitte der gestrichelten Linie in der Abb. 79 gelegen) diese entgegengesetzte Richtung haben. Dieses Feld schwächt also das äußere Feld, durch welches es hervorgebracht ist, im ganzen Inneren des Dielektrikums, und dies ist der Grund, warum der Zug der äußeren Kraftlinien im Dielektrikum vermindert ist. Die Verminderung des Zuges, welche wir durch Kapazitätsänderung und elektrischer Waage nachgewiesen haben (107, 108) und von der wir ausgegangen sind, ist somit Wirkung der eigenen, von außen her in der angegebenen Weise beeinflußten elektrischen Kraftfelder der Moleküle des Dielektrikums. Auch die in der Umgebung eines Dielektrikums auftretenden Veränderungen des elektrischen Feldes, welche wir am Beispiel der Kugel im homogenen Felde betrachtet hatten (111, Abb. 87), können als Übereinanderlagerung des ursprünglichen Feldes und des Eigenfeldes der dielektrischen Verschiebungen angesehen werden (wonach auch Abb. 87 gezeichnet ist), und man kann diese Übereinanderlagerung in Rechnung durchführen.

---

[1]) Sind frei bewegliche Elektrizitäten im Dielektrikum, so trennen sich die Kraftlinien in demselben, ziehen sich bis an die Grenzen gegen Nichtleiter nach außen hin zusammen und verschwinden dadurch aus dem Dielektrikum; Kraftlinienverteilung und Kräfte werden dadurch gleich denen an Leitern.

[2]) Der isolierte Leiter formt die Kraftlinien wie ein Dielektrikum der Konstante $\varepsilon = \infty$.

Man sieht, daß die Eigenschaften der Kraftlinien im Dielektrikum (107, 110—112) — wozu vor allem ihre Zugverminderung gehört — vollkommen auch diese Mitwirkung der Moleküle umfassen, so daß es unnötig ist, auf die wenig sicher bekannten Vorgänge in den Molekülen einzugehen, wenn man nicht eben diese selbst untersuchen will[1]). Im allgemeinen ist zu sehen, daß die Dielektrizitätskonstante, welche die innere Zugverminderung bemißt, unmittelbar Aufschluß gibt über die Gesamtverschieblichkeit der Elektrizitäten der Moleküle des Dielektrikums; je größer die Dielektrizitätskonstante, desto mehr Elektrizität ist verschiebbar im Dielektrikum, bzw. auf um so größere Strecken ist sie durch gleiche elektrische Kraft verschiebbar; Menge und Strecke wirken hier in gleichem Sinne. Das richtige Maß für diese Verschieblichkeit der Elektrizitäten im Dielektrikum ist aber nicht ε selbst, sondern $\varepsilon - 1$, weil nach der Bemessungsweise der Dielektrizitätskonstante (106) ihr Wert im materiefreien Raum nicht 0 sondern 1 ist.

Bei Kristallen, deren Moleküle (Atome) geordnet sind (M 249), können die mit den dielektrischen Verschiebungen verbundenen Abstandsänderungen entgegengesetzt geladener Atome Änderungen der Abmessungen des ganzen Kristalls bewirken. Ist z. B. eine geeignet geschnittene Quarzplatte beiderseits mit leitender Belegung versehen, so tritt bei Ladung der Belegungen eine Dickenänderung der Platten ein, die ihr Zeichen mit dem Ladungssinn wechselt. Schaltet man eine elektrische Schwingung (395) an die Belegungen, die in Periodendauer mit der elastischen Schwingung der Platte übereinstimmt, so wirkt dieselbe als intensive Schallquelle. (vgl. A 102). Zugleich ist ein solcher Quarzoszillator ein Mittel zur Aufrechterhaltung elektrischer Schwingungen von äußerst konstanter, hoher Frequenz (E 477).

114. Rückstandsbildung. — Es kann vorkommen, daß die dielektrischen Verschiebungen nicht gleich wieder verschwinden, wenn das Dielektrikum aus dem Feld genommen wird, das die Verschiebungen hervorgebracht hatte. Es bleibt dann das Eigenfeld der Verschiebungen an dem Dielektrikum sitzen, und man kann nachweisen, daß es auch ein wenig nach außen in die nähere Umgebung des Dielektrikums sich erstreckt. Man nennt diese dielektrische Unvollkommenheit „Rückstandsbildung"; sie ist auch mit einem verzögerten Eintreten der Verschiebungen verbunden und ist unerwünscht für Kondensatoren, deren Kapazität scharf begrenzt sein soll. Glimmer, gutes Flintglas und Quarz zeigen wenig Rückstandsbildung, und sind daher als Dielektriken für Normalkondensatoren (102) brauchbar.

Ein Kondensator mit rückstandsbildendem Dielektrikum, wie z. B. gewöhnlichem Glas, zeigt sich einige Zeit nach vollständiger Entladung von neuem geladen, wenn auch nur schwach; er zeigt einen „Rückstand". Es ist das inzwischen erfolgte Verschwinden des entgegengerichteten Restfeldes im Dielektrikum (113), welches in der Wirkung auf die Platten des Kondensators, wenn diese genügend dicht am Dielektrikum liegen, dem Entstehen eines gleichgerichteten Feldes gleichkommt.

115. Kleistsche Flasche (Leydener Flasche). — Die kapazitätsvermehrende Wirkung der Isolatoren von großer Dielektrizitätskonstante kommt zur Benützung in den „Leydener Flaschen" zur Aufhäufung großer Elektrizitätsmengen. Die aufgehäuften Mengen werden dabei um so größer, als diese Flaschen auch auf hohe Spannungen eingerichtet sind. Sie sind flaschenförmig zusammengebogene Plattenkondensatoren (84) mit dem Glas der Flasche als Dielektrikum und einem äußeren und inneren Stanniolbelag als Leiterflächen (Abb. 88). Die Wirksamkeit wurde früh gefunden (zuerst von Jürgen von Kleist in Pommern, 1745, durch eine mit leitender Flüssigkeit gefüllte, außen mit der Hand umfaßten Flasche, in der die Flüssigkeit mittels eines Zuleitungsdrahts geladen wurde, wobei dann die Entladung beim Anfassen des Zuleitungsdrahtes mit der anderen Hand einen stark fühlbaren Schlag ergab).

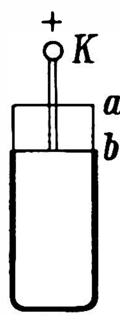


Abb. 88. Kleistsche Flasche.

[1]) Besonders im flüssigen Zustande haben sich Untersuchungsweisen der Moleküle durch Messungen von Dielektrizitätskonstanten ergeben, wobei meist schnell wechselnde elektrische Felder benutzt werden, die ebenso schnell wechselnde Verschiebungen oder Drehungen der Moleküle oder ihrer Teile hervorbringen, wobei Isolationsmangel wenig stört.

Um eine Kleistsche Flasche zu laden, verbindet man ihre beiden Belegungen durch Drähte mit den beiden Enden der Elektrizitätsquelle, die doch stets beide Elektrizitäten in der nötigen gleichen Menge liefert (77), z. B. mit den beiden Endkugeln einer Influenzmaschine (B_1 B_2, Abb. 69, 24). Als Zuleitung zur inneren Belegung der Flasche dient der Stiel mit der Kugel K (Abb. 88). Es ist aber nicht nötig, beide Belegungen von der Erde zu isolieren; es genügt die durch die Flasche von selbst gegebene Isolation der inneren Belegung und ihrer Zuleitung. Die äußere Belegung kann unisoliert auf dem Tische stehen, weil die Kraftlinien von ihr doch nicht zur Erdumgebung, sondern zur inneren Belegung gehen und zwar ganz überwiegend durch das Glas der Flasche, wie es der Abb. 83 entspricht. Es wird dann am einfachsten überhaupt nur die innere Belegung mit der einen Endkugel der Maschine verbunden, während die äußere Belegung sowie die andere Endkugel Erdleitung erhalten.

116. Durchschlagsfestigkeit. — Die Grenze für die Ladung, welche die Flasche aufnehmen kann, ist durch die Spannung gegeben, welche die Flasche verträgt. Lädt man auf zu hohe Spannung, so wird das Glas der Flasche durchschlagen; das Glas hält dann nicht mehr stand als Isolator, sowie es auch die Luft nicht mehr tut, wenn die Spannung zu hoch wird (26). Die Erscheinung beim Durchschlagen des Glases ist ähnlich der des Funkens in der Luft; es bildet sich von selber, durch die Spannung, ein leitender Kanal durch das Glas, durch welchen dann sämtliche aufgespeichert gewesene Elektrizität sich entlädt. Während aber beim Funken in der Luft dieser leitende Kanal sofort nach erfolgter Entladung von selber wieder verschwindet, bleibt er beim Glase als Durchlöcherung bestehen; die Flasche ist dann verdorben. Damit dies nicht eintrete, ist der unbelegte Glasrand a b der Flasche von solcher Breite zu wählen, daß der Funke eher um diesen Rand herum, der Glasoberfläche folgend, durch die Luft schlägt als durch das Glas. Die große Breite, welche man hierzu dem Glasrand im Verhältnis zur Wanddicke der Flasche geben kann, zeigt, daß Glas viel schwerer durchschlagen wird als Luft. Es kommt hier eine neue Eigenschaft von Isolatoren zur Geltung: die „Durchschlagsfestigkeit" oder „elektrische Festigkeit", die beim Glase und überhaupt bei festen und auch flüssigen Isolatoren so sehr viel größer ist als bei Luft; sie wird gemessen durch die Spannungen, welche gegebene Schichtdicken der betreffenden Stoffe eben noch vertragen können.

Diese elektrische Festigkeit ist verschieden von den drei anderen, schon betrachteten elektrisch wesentlichen Eigenschaften der Isolatoren: der Isolationsfähigkeit (Güte als Isolator, spezifischer Widerstand, welcher das Reziproke des Leitvermögens ist, vgl. 4, 157), der Dielektrizitätskonstante (Güte als Dielektrikum, Aufnahmefähigkeit für Kraftlinien, 106, 112) und der Rückstandsbildung (Zuverlässigkeitsmangel als Dielektrikum, 114).

117. Aufhäufung großer Elektrizitätsmengen, und Energiewirkungen bei deren Entladung. — Die große Kapazität einer Kleistschen Flasche auch nur von mittlerer Größe zeigt sich schon beim Laden derselben mit der Influenzmaschine: Man hat viel länger zu drehen an der Maschine bis Zeichen hoher Spannung erfolgen, die ohne die Flasche sofort kommen, z. B. an einem mitgeladenen Papierbusch (26). Am einfachsten verwendet man die Funkenstrecke zwischen den Endkugeln der Maschine (B_1 B_2, Abb. 69) als Spannungszeiger; es springt jedesmal ein Funke über, wenn die Maschine die Elektrizitätsmenge geliefert hat, die zur Erreichung der betreffenden Spannung, z. B. 80000 Volt bei 3 cm Funkenstrecke, erforderlich ist. Ohne angeschaltete Flasche springen fortwährend in schneller Folge Funken über, weil die Kapazität der betreffenden Maschinenteile klein ist; mit der Flasche entstehen beträchtliche Pausen zwischen den Funken, und die Länge der Pausen ist ein Maß für die Kapazität der Flasche, weil jeder Funke sie vollkommen entlädt, so daß sie immer wieder neu aufgeladen werden muß.

Diese Funken bei angeschalteter Flasche unterscheiden sich auch auffallend von denen ohne Flasche: sie knallen viel stärker, leuchten viel heller und zeigen auch wesentlich mehr Wärmewirkung; die Dauer ihres Leuchtens ist indessen stets sehr kurz, nach Milliontel Sekunden zählend (vgl. 27).

Die Wärmewirkungen bei der Entladung größerer, in Kleistschen Flaschen aufgehäufter Elektrizitätsmengen in so kurzen Zeiten können sich auch an den metallischen Leitern zwischen Flasche und Funkenstrecke zeigen, welche diese Elektrizitätsmengen während der Dauer des Funkens führen. Sind diese Leiter genügend dünn, z. B. haarfeine Drähte oder Stanniolstreifen, so erglühen sie bei der Entladung; sie können auch schmelzen und verbrennen oder zerstäubt werden.

Auch andere, mechanische Wirkungen können beobachtet werden: Versetzt man die entladende Funkenstrecke unter Wasser, das in einem Glasgefäße sich befindet, so wird das Gefäß zerschlagen; das Wasser hat bei der kurzen Dauer der Entladung nicht Zeit, fortzufließen und der plötzlichen Dampfentwickelung Raum zu geben; es überträgt daher den Stoß an die Glaswand.

Elektrische Energie.

118. Kleistsche Flasche als Beispiel. — Die Erscheinungen der Schall-, Licht-, Wärme- und mechanischen Wirkungen bei Entladung von Keistschen Flaschen (117) zeigen aufs deutlichste, daß eine geladene Kleistsche Flasche einen Energievorrat enthält, der bei ihrer Entladung verfügbar wird und in veränderten Formen weitergeht. Mit Recht haben wir die „geladene Leydener Flasche" in unserer Tabelle der Energieformen (Tab. 42, M Tab. 5) als Beispiel eines Vorrates von elektrischer Energie aufgeführt. Die Flasche kann in geladenem Zustand auch abgetrennt von der Elektrizitätsquelle mit diesem Energievorrat aufbewahrt werden, und sie behält ihn, insofern die Isolation nicht versagt.

Die Flasche hat die Energie offenbar während der Ladungszeit aus der ladenden Maschine aufgenommen, und diese ihrerseits hat die Energie von der gedrehten Kurbel aus übernommen. Wir haben bereits bei der Betrachtung des Elektrophors und der Elektrisiermaschinen gezeigt (23, 24), daß diese Vorrichtungen nur unter demjenigen Arbeitsaufwand freie elektrische Ladungen liefern können, welcher zur Trennung der beiden Elektrizitäten erforderlich ist und welcher dann in den getrennt aufgehäuften Elektrizitäten, wie in der geladenen Flasche, vermöge deren Anziehung auch stets wieder verfügbar ist. Auch überlegten wir bereits (32), daß die Größe des Arbeitsaufwandes für ein bestimmtes Ladungsergebnis, z. B. an der Kleistschen Flasche, unabhängig sein muß von dem Wege, auf welchem die Ladungen getrennt und zur Aufhäufungsstelle gebracht worden sind. Die zur Ladung aufgewandte Arbeit und die damit aufgehäufte elektrische Energiemenge müssen daher stets einander gleich sein, wie es auch unmittelbar dem Energiegesetz entspricht. Dieses Ergebnis stimmt in allen Folgerungen mit der Wirklichkeit überein, was einem Nachweis der Gültigkeit des Energiegesetzes auch bei Benutzung elektrischer Kräfte bedeutet.

119. Die Berechnung elektrischer Energie ist bereits gegeben durch die Kenntnis von der elektrischen Spannung und ihrer Bemessung durch Arbeit (30, 94). Die Spannung in der in Ladung begriffenen Vorrichtung, z. B. der

Tab. 5. **Formen der Energie (Formen von Arbeitsvorrat).**

	Beispiele	Maß in Meterkilogrammen
Potentielle Energie (Spannkraft)	Gehobenes Gewicht; Gespannte Feder	Kraft × Weg
Kinetische Energie (Lebendige Kraft)	Abgeschossene Kugel; Eisenbahnzug in Fahrt	Masse $\times \frac{(\text{Geschwindigkeit})^2}{2}$
Wärme	Heißer Körper	1 Kalorie = 427 Meterkgr.
Chemische Energie	Pulverladung; Kohlen- und Luftvorrat	(Nach Umwandlung in Wärme zu messen)
Elektrische Energie	Geladene Leydener Flasche	Spannung × Menge. 1 Voltcoulomb (= 1 Voltwebersekunde) = 0·102 Meterkilogramm

Kleistschen Flasche, ist gemessen durch die Arbeit zur Erhöhung der Ladung um eine Mengeneinheit entgegen der vorhandenen Spannung. Wird bei gleichbleibender Spannung V nicht die Mengeneinheit, sondern eine Ladung von e Mengeneinheiten zugeführt, so ist die Arbeit eV, und dies gilt für jeden Fall von Elektrizitätszufuhr. Wir halten daher fest, daß elektrische Ladungsarbeit, d. i. die mit der Ladung überführte elektrische Energiemenge, stets gegeben ist durch das Produkt aus der zugeführten Menge und der Spannung, bei welcher sie zugeführt wird. In dieser Weise, als Spannung · Menge, findet sich die Bemessung der elektrischen Energie auch in unserer Energietabelle (Tab. 42) eingetragen.

Es kommt oft in den Anwendungen vor, daß große Ladungsmengen und damit große Energiemengen bei dauernd gleichbleibender Spannung übertragen werden; es sind dies die alltäglichen Fälle der Lieferung von elektrischer Energie aus den Kabeln der Elektrizitätswerke. Die Spannung bleibt dabei gleich, weil Zufuhr und Verbrauch der Ladung einander gleich sind. Wir behandeln diese Fälle dauernd bewegter Elektrizität, „konstanten Stromes", in der Elektrodynamik (vgl. 216).

Bei Aufhäufung freier Ladung und damit auch von Energie, wie bei der Aufladung der Kleistschen Flasche, steigt die Spannung stetig an; sie ist im Anfang der Ladung Null, und erst am Schlusse ist die volle Spannung V erreicht. Es wird daher bei der Ladung im Anfang gegen geringe Spannung, also wenig gearbeitet, zuletzt am meisten, gegen die volle Endspannung V. Durchschnittlich wird gegen Spannung V/2 gearbeitet, was richtig gerechnet ist, weil die Spannung bei der konstanten Kapazität proportional der Menge steigt (Gl. 47). Somit ist die Arbeit für die e Mengeneinheiten im ganzen eV/2, und dies ist die in der geladenen Vorrichtung aufgehäufte und aufbewahrbare Energie.

Diese Berechnungsweise gilt für alle Fälle der Neuherstellung von elektrischen Feldern, da diese stets vom Felde Null aus und also von der

Spannung Null aus erfolgen muß, und es ist somit der Energieinhalt eines beliebigen elektrischen Feldes eV/2, wobei V die Spannung zwischen den Enden der Kraftlinien des Feldes und e die Ladung an den Enden ist. Daß dabei nur die Ladung eines Zeichens zu rechnen ist, geht daraus hervor, daß der Übergang dieser Ladung zum anderen Ende der Kraftlinien bereits vollständige Entladung ergibt.

120. Einheiten. — Will man die elektrische Energie in bestimmten Einheiten haben, so kommt es auf die Einheiten für Spannung und Menge an. Sind es absolute elektrostatische CGS-Einheiten (33, 15), so erhält man die Energie in der Einheit desselben (CGS-) Systems, d. i. in Zentimeterdyn. 1 cmdyn wird auch erg genannt; es ist etwa gleich 1 cmmgr oder 10^{-8} mkgr irdisch (M 192). Sind Spannung und Menge in Volt und Coulomb gemessen, so ist — nach der Bemessung dieser Einheiten (33, 15, 262 u. f.) — für 1 Voltcoulomb 0·102 mkgr zu rechnen (wie in Tab. 42 angegeben), wofür wir öfter rund 0·1 mkgr setzen werden[1]).

121. Es sei als Beispiel von Energieberechnung eine Kleistsche „Batterie" aus 6 oder 10 Flaschen betrachtet, alle inneren sowie alle äußeren Belegungen miteinander verbunden, so daß die Kapazitäten sich addieren. Die Gesamtkapazität sei 0·05 Mikrofarad = $5 \cdot 10^{-8}$ Farad (50) und sie sei auf 3 cm Funkenlänge = 80000 Volt (34) geladen; dies gibt leicht die vorher (117) bemerkten Glühwirkungen, Zerstörungswirkungen usw. bei der Entladung. Die aufgehäufte Elektrizitätsmenge ist dabei $5 \cdot 10^{-8}$ Farad · 80000 Volt = 0·004 Coulomb und somit die Energie $\frac{1}{2}$ 80000 Volt · 0·004 Coulomb = 160 Voltcoulomb = 16 mkgr. Es ist klar, daß man mit 16 kgr, die 1 m hoch gehoben sind, Zerstörungen und auch die nicht großen Wärmemengen zum Schmelzen sehr dünner Drahtstücke hervorbringen kann; auch verspürt man beim Laden der Batterie an der Kurbel der Influenzmaschine eine über die Reibungsarbeit des Leerlaufes merklich hinausgehende Arbeitsleistung, wie sie jener Gewichtshebung entspricht. Die große Heftigkeit, welche den Entladungswirkungen der Batterie eigen ist, hängt mit der Kürze der Zeit zusammen, innerhalb welcher die ganze, an sich nicht große Arbeit von 16 mkgr verfügbar wird. Ist die Zeitdauer der Funkenentladung, während welcher die Energiemenge zur Weiterverwendung kommt, 10^{-4} Sekunde, so ist die Leistung (vgl. M 293, auch 216 im folgenden) innerhalb dieser Zeit 16 mkgr/10^{-4} sek = 160000 mkgr/sek = 2100 PS[2]). Die Leistung ist also sehr groß, wenn auch nur von sehr kurzer Dauer.

122. Sitz der elektrischen Energie. — Die elektrische Energie sitzt **immer im Felde, wo die Kraftlinien sind.** — Ohne Kraftlinien ist keine elektrische Energie vorhanden. Die Energie kann mit diesem Felde, z. B. in der Kleistschen Flasche, beliebig von Ort zu Ort geführt werden, wobei es nur auf das Feld ankommt; die Belegungen und das Dielektrikum wirken nur als Träger des Feldes. Die Energie kommt in irgendeine Vorrichtung auch nur hinein, wenn Kraftlinien hineinkommen, was beim Laden z. B. von der Elektrisiermaschine aus geschieht. Es wandern beim Laden (115) nicht nur die Elektrizitäten beiderlei Zeichens an den Zuleitungsdrähten in die Belegungen, sondern diese Elektrizitäten sind immer durch die Kraftlinien paarweise miteinander verbunden (77), und es wandern somit im Zwischenraum der beiden Zuleitungsdrähte auch die Kraftlinien von der Elektrizitätsquelle aus, quer zu ihrer eigenen Richtung fortschreitend, in die Flasche hinein (vgl. 125), wo sie sich zwischen den Belegungen häufen. Daß nicht etwa nur die Enden der hineinwandernden Kraftlinien, die Elektrizitäten, Sitz der Energie sein können, dies geht schon daraus her-

---

[1]) Für Voltcoulomb wird manchmal der Name „Joule" gebraucht.

[2]) PS = 75 mkgr/sek, die „Pferdekraft", die technische Leistungseinheit, ist etwa die Leistung eines Pferdes.

vor, daß die Energie außer von der Menge der Elektrizität auch von der Spannung abhängt, welche letztere, wie die Kapazität, durch Gestalt und Stoff des Dielektrikums, eben des Raumes, in welchem die Kraftlinien sitzen, bestimmt ist (104).

123. Energiedichte. — Um die Energieverteilung im elektrischen Felde zu suchen, drücken wir jetzt den Energieinhalt eines Feldes, und zwar zunächst des Plattenkondensators (84, Abb. 83), statt durch Spannung V und Menge e (119) durch die Feldstärke E ($= E_n$ im Plattenkondensator) aus. Es ist $V = Ea$ (100) und $e = \sigma f = (E\varepsilon/4\pi)$ f (110), somit der Energieinhalt $Ve/2 = Ea\sigma f/2 = (E^2\varepsilon/8\pi)\cdot af$. Da af das Volum des überall gleich beschaffenen Feldes des Kondensators ist, den wir stets als so groß und eng annehmen, daß der äußere Teil des Feldes verschwindend klein ist, so ist die Energie der Volumeinheit des Feldes, die „Energiedichte", gegeben durch $E^2\varepsilon/8\pi$.

Dieses Ergebnis gilt für jedes beliebig geformte Feld. Denn die Berechnung hätte ebensogut für ein beliebiges Raumelement in irgendeinem Felde durchgeführt werden können, von dem zwei gegenüberliegende Grenzflächen senkrecht zu den Kraftlinien stehen; V wäre dann der Spannungsunterschied zwischen den zwei Grenzflächen (95) und e die Ladung, welche für die gegebene Kraftlinienzahl an ihnen sitzen müßte. Es ist daher ganz allgemein die Energiedichte $\mathfrak{D}_e$ im elektrischen Feld E

$$\mathfrak{D}_e = \frac{E^2\varepsilon}{8\pi}. \qquad 123)$$

Im Vakuum ist danach die Energiedichte $E^2/8\pi$.

Es ist also in der Tat nur die Feldstärke E und die durch ε gegebene Art der Raumerfüllung, welche die Verteilung der Energie im Raume bestimmt, ganz wie es der elektrischen Energie als eines Zubehörs zum elektrischen Felde entspricht. Daß hierbei die zweite Potenz von E maßgebend ist, nicht die erste, dies wäre als einfachste Möglichkeit allein schon daraus zu schließen gewesen, daß die Energie keine gerichtete Größe (Vektorgröße) ist wie die Feldstärke oder elektrische Kraft E (64); der Energieinhalt jedes Feldteiles muß daher, wie es bei der zweiten Potenz zutrifft, unabhängig sein von der Richtung der elektrischen Kraft dortselbst.

Hervorzuheben ist, daß bei aneinandergrenzenden Feldern mit gemeinsamen Kraftlinien, aber verschiedener Dielektrizitätskonstante, wie z. B. bei der dielektrischen Kugel in Luft oder Vakuum (Abb. 87), die Energiedichte stets im Medium mit der größeren Dielektrizitätskonstante kleiner ist. Es kommt dies von der kleineren Feldstärke in letzterem Medium und von derem quadratischen Einfluß auf die Energiedichte, wie es weiter unten auch an einem Beispielsfall sich zeigt (128).

124. Energie einer Kraftlinie. — Man kann nun aus dem Kraftlinienlauf leicht übersehen, wie die Energie in einem gegebenen Felde verteilt ist: sie sitzt (bei einheitlicher Dielektrizitätskonstante) am meisten dort, wo die Kraftlinien am dichtesten sind.

Man kann auch jeder einzelnen Kraftlinie eine bestimmte Energiemenge zuschreiben, wobei die Kraftlinie als Achse eines Raumteiles aufzufassen ist, der sie in ihrer ganzen Länge rings umgibt, überall mit einem Querschnitt, der bis halbwegs zur nächsten Kraftlinie reicht, so daß der ganze Raum in ebensoviel Teile zerfällt als Kraftlinien da sind (vgl. 67, 88). Man sieht leicht ein, daß dann im Zustand der Ruhe jeder Kraftlinie, die am selben Leiterpaar

sitzt, die gleiche Energiemenge zugehören muß; denn jede Kraftlinie trägt dieselbe Elektrizitätsmenge und hat beim selben Leiterpaar dieselbe Spannung zwischen ihren Enden.

Kurze und lange Kraftlinien am selben Leiter haben somit im Gleichgewicht gleiche Energiemenge. Man sieht daraus beispielsweise, daß bei Wanderungen der Kraftlinien längs der Leiteroberfläche in der Nähe des Gleichgewichtszustandes, wie es beim Aufladen vorkommt (125), an Stellen vergrößerten Abstandes der Leiter beliebige Verlängerungen von Kraftlinien stattfinden können, ohne daß dies Energieaufnahme in dieselben bedeutete. Man darf daher den Auflade- oder auch Entlade-Vorgang vereinfachend an parallelen Drähten betrachten.

Der Energieinhalt von 1 cm Kraftlinie im Felde E ist $E/8\pi$, weil der Energieinhalt $E^2\varepsilon/8\pi$ in 1 cm^3 auf εE Kraftlinien verteilt ist (110).

Man sieht, daß jede Kraftlinie und jeder Teil einer solchen zwar immer Energie enthält — verteilt in dem zur Kraftlinie gehörenden Raum —, daß die Menge dieser Energie aber wechseln kann, da sie nach der Dichte E der umgebenden Kraftlinien sich richtet[1]).

125. Energiewanderungen mit den Kraftlinien. — Wenn ein Leiter geladen wird, wie z. B. der Plattenkondensator von der Elektrisiermaschine, so bringt jede von der Maschine her in Querbewegung kommende, an den Zuleitungsdrähten mit ihren Enden entlang gleitende Kraftlinie ihre Energie mit in den Kondensator, wo die Häufung stattfindet (122). Es ist das seitliche Drängen der Kraftlinien, das ihre Bewegung veranlaßt und sie so in den Kondensator gelangen läßt; dieses Drängen ist nämlich größer an den Orten der größeren Spannung, d. i. bei der Elektrizitätsquelle, wo die Kraftlinien dichter aneinander gehäuft sind (88, 92). Wie das Gleiten der Kraftlinienenden an den Leiteroberflächen im einzelnen zu denken ist, haben wir früher schon auseinandergesetzt (85, 86).

Die umgekehrte Bewegung der Kraftlinien mit ihrer Energie findet bei Entladung des Kondensators statt (vgl. 93). Wenn dieselbe durch zwei Drähte erfolgt — von jeder Platte einer ausgehend und bis zu der in beliebiger Entfernung liegenden Vereinigungsstelle sich erstreckend —, so gleiten die Kraftlinien aus dem Zwischenraum der Platten heraus an den Drähten entlang bis zur Vereinigungsstelle, wo etwa eine kleine Funkenstrecke sei, in der sie zu molekularer Kürze schrumpfen, wobei ihre Energie die Form von Wärme (und Licht und Schall) annimmt.

Die Kraftlinien stehen bei dieser Bewegung an gut leitenden Drähten immer nahe senkrecht zu denselben (merklich schief nur bei großen Widerständen der Leitung, s. 162) und damit senkrecht auch zu ihrer Fortbewegungsrichtung. Krümmungen der Drähte, welche Verkürzungen oder Verlängerungen der Kraftlinien bei deren Fortschreiten bedingen, sind ohne Einfluß (124).

126. Die Geschwindigkeit des Entlanggleitens von Kraftlinien an Leitern ist bei plötzlichen Entladungen gemessen worden; sie ist nahe Lichtgeschwindigkeit.

---

[1]) Die allgemeine Betrachtung der Energiewanderungen im Anhang E V c (Bd. IV) zeigt auch, daß Kraftlinienbewegung zwar Energiebewegung ist, daß aber die Kraftlinien zu allgemeiner Darstellung der Energiewanderungen nicht so gut geeignet sind wie zur Darstellung der Kräfte (vgl. auch Anhang E V b, 7, Bd. IV).

Man hat dazu den Zeitunterschied zweier Funken gemessen am Anfang und am Ende einer langen Drahtleitung, durch welche Kleistsche Flaschen sich entluden. Die Funken werden zu dieser Messung durch Umbiegen der Drahtleitung nebeneinander verlegt und im Drehspiegel beobachtet oder in eine schnell rotierende Stahlwalze schlagen gelassen. Die Kraftlinien können dabei entweder zwischen zwei Drähten gleiten, wie vorher betrachtet, in welchem Falle die lange Drahtleitung doppelt sein muß, oder man läßt sie zwischen einer einfachen Drahtleitung und der Erde gleiten. Gemessen wurde die Geschwindigkeit beispielsweise an einer gewöhnlichen Telegraphenleitung zu 230000 km/sek (Siemens 1875). Am besten nachgewiesen ist die Querbewegung der Kraftlinien mit Lichtgeschwindigkeit, 300000 km/sek im materiefreien Raum, an den elektrischen Wellen (412 u. f., s. besonders 420). Das Ergebnis der Kraftlinienbewegung mit voller Lichtgeschwindigkeit in den freilaufenden elektrischen Wellen und nahe mit Lichtgeschwindigkeit an Drähten ist auch in Übereinstimmung mit der in Gleichungen zusammengefaßten allgemeinen Kenntnis und ist somit gut gesichert[1]).

Daß auch beliebig langsame Fortbewegungen von Kraftlinien vorkommen, dies zeigte jeder bewegte, geladene Körper, der sein Kraftfeld mit sich nimmt.

127. Energiewanderungen in die Kraftlinien. — Wir betrachten noch eine andere Art des Steigerns des Energieinhaltes eines Kondensators als durch Zufuhr neuer Kraftlinien und damit auch vermehrter Ladung; nämlich die Steigerung durch Auseinanderziehen der beiden Platten bei unveränderter Ladung. Die Energie steigt dann proportional dem Plattenabstand, weil das Feldvolum bei gleichbleibender Feldstärke proportional diesem Abstand wächst. In diesem Falle wird die Energie durch den Stoff der Platten zugeführt, ausgehend z. B. von der Hand, die an der Platte zieht; sie gelangt so bis an die Enden der an der Platte sitzenden Kraftlinien und geht dann von diesen Enden aus ins Feld. Die Kraftlinien werden dabei länger. Man kann wohl sagen, sie dehnen sich wie elastische Fäden, insofern solchen die Energie ebenfalls vom gezogenen Ende aus zugeführt wird; jedoch bleibt bei den in Verlängerung begriffenen Kraftlinien im Kondensator die Energie der schon vorhandenen Teile ungeändert, weil ihre Dichte ungeändert bleibt, und der Energiezuwachs findet sich nur in den neu hinzukommenden Längen.

Daß die Energiezunahme und Abgabe der Kraftlinien an deren Enden stattfindet, dies entspricht auch ganz der bereits ausgeführten Kraftberechnung (89) für die Leiteroberflächen, an welchen Kraftlinienenden sitzen. Wir fanden den Zug einer Kraftlinie im freien Felde zu $E/4\pi$, an ihren Enden aber nur halb so groß, $E_n/8\pi$ (88, 89). Mit letzterem Zug berechneten wir die Kraft auf eine Kondensatorplatte von der Fläche f (im Vakuum) zu $K = E^2 f/8\pi$ (91); danach ist die Arbeit beim Auseinanderziehen der Platten mit gleichbleibender Ladung und also auch gleichbleibendem Felde E von verschwindend kleinem Abstand aus auf den Abstand a $Ka = E^2 fa/8\pi$. Diese aus mechanischer Kraft K und Weg a berechnete, am Kondensator aufgewandte Arbeit muß als Energie seines dabei geschaffenen elektrischen Feldes in ihm enthalten sein, und dies ist auch, wie man aus der Gleichung sieht, wirklich der Fall, da $E^2 fa/8\pi$ der Energieinhalt des Feldes ist (123)[2]).

128. Berechnung von Kräften aus der Energie des Feldes. — Wir fanden den Druck, d. i. die Kraft an der Flächeneinheit einer Leiteroberfläche im Vakuum $P = E^2/8\pi$, wenn E das angrenzende Feld ist (90). Dies ist aber

[1]) Siehe Anhang E V a, 11 und V b, 9, Bd. IV.

[2]) Mit dem doppelt so großen Zug der Kraftlinien im freien Felde (88) würde die Arbeit doppelt so groß sich ergeben haben, was nicht der Gesamtheit aller vorhergegangenen Überlegungen und nicht der Wirklichkeit entspricht. Man kann hierzu bemerken, daß wir nun im ganzen auf drei verschiedenen Wegen übereinstimmend zum Faktor ½ für die Kraftwirkung an Leiteroberflächen gelangt sind: 1. aus Coulombs Gesetz (73, vgl. Note zu 89), 2. aus dem Zug der Kraftlinien (89) und 3. aus der Energie (127).

auch der Energieinhalt der Volumeinheit dieses Feldes (123). Diese Gleichheit, welche auch bei Anwesenheit eines Dielektrikums gilt, ist selbstverständlich, wenn man bedenkt, was bei einer kleinen Verschiebung („virtuellen Verrückung", vgl. M 91) der Oberfläche in Kraftrichtung geschehen würde. Es würde Arbeit von der Kraft geleistet und an die Oberfläche abgegeben werden, die nach dem Energiegesetz gleich der Energieabnahme des Feldes sein muß. Letztere ist das Produkt aus Energiedichte und Volumänderung des Feldes, während die ihr gleiche Arbeit Produkt aus Druck und der gleichen Volumänderung ist (M 378); Druck und Energiedichte nächst der Druckfläche müssen also einander gleich sein[1]).

Ist daher die Energiedichte eines elektrischen Feldes nächst einer Fläche bekannt, so kennt man damit auch den Druck, welchen die Fläche erfährt.

Es sei als Beispiel ein Kondensator mit horizontalen Platten betrachtet, dessen elektrisches Feld teilweise mit einer dielektrischen Flüssigkeit der Konstante ε erfüllt sei, deren Oberfläche parallel den Platten in beliebiger Höhe zwischen denselben steht. Daß das Dielektrikum möglichst ins Feld hineingezogen wird, daß also die Flüssigkeit zwischen den Platten höher stehen wird als rings außerhalb des Feldes derselben, dies ist unmittelbar nach früherem zu schließen (112); es werde aber jetzt die Höhe des Anstieges, die „elektrische Steighöhe" h berechnet.

Das elektrische Feld über der Flüssigkeit sei E; in der Flüssigkeit ist es dann E/ε (111). Die Energiedichte ist daher (123) über der Flüssigkeit $E^2/8\pi$ und in der Flüssigkeit $(E/\varepsilon)^2 \cdot \varepsilon/8\pi = E^2/8\pi\varepsilon$. Der Druck wird in diesem Falle gleich der Differenz der beiden Energiedichten sein; denn es verschwindet zwar beim Steigen der Grenzfläche ein Teil des oberen, energiereicheren Feldes, wofür aber unten ein gleiches Volum des energieärmeren Feldes in der Flüssigkeit erscheint, so daß nur die Differenz als Hebungsarbeit übrigbleibt. Da der Flüssigkeitsdruck beim spezifischen Gewicht s der Flüssigkeit hsg ist (M 301), wobei die Schwerebeschleunigung g zur Umrechnung in die hier benutzten absoluten Einheiten (M 192) dient, so wird $\frac{E^2}{8\pi}\left(1-\frac{1}{\varepsilon}\right) = hsg$ und somit die elektrische Steighöhe

$$h = \frac{E^2}{8\pi sg} \cdot \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon}. \qquad 128)$$

Die Gleichung dient im ganz gleichen Falle magnetischer Felder zur Messung derselben mittels „magnetischer Steighöhen"[2]), und auch die auf Eisen im Magnetfeld ausgeübten Kräfte sind ebenso zu berechnen (275).

129. Die Kraftlinien als Linien der Energieverteilung im Äther. — Wir kamen und kommen — wie schon eingangs hervorgehoben (60—63) — überall, wo wir elektrische (und magnetische) Erscheinungen möglichst zu verstehen suchen, auf die Kraftlinien im Raume als das wesentlich Zugrundeliegende. Sie sind ohne Zweifel die geometrischen Darstellungen der besonderen, den Sinnen an sich verborgenen Naturdinge, die in den elektrischen (und magnetischen) Erscheinungen ihr Dasein zeigen; etwas Neuartiges, von der sinnlich so leicht wahrnehmbaren Materie Verschiedenes, dessen Erkenntnis als Hauptertungenschaft des Studiums der elektrischen und magnetischen Erscheinungen gelten kann.

Die Frage wäre danach: was denn die Kraftlinien oder die durch sie in ihrer räumlichen Verbreitung dargestellten Naturdinge des näheren seien? Vor allem ist zu bedenken, daß gleichzeitige Anwesenheit von Materie im Raume, wie

[1]) Der allgemeine Zusammenhang von Druck und Energiedichte (M 376) bewährt sich hiermit auch für die elektrische Energie (vgl. auch 433).

[2]) Zur Messung elektrischer Felder ist das Verfahren nicht so brauchbar, weil die immer mehr oder weniger mangelhafte Isolierfähigkeit der Dielektriken stört (vgl. Note zu 112).

in den dielektrischen Stoffen, nicht wesentlich für die Kraftlinien ist. Denn sie wirken auch im von Materie freien Raum so wie im Luftraum (3); Anwesenheit von Materie bringt nur Verwickelungen hinzu (113, 114), und dies gilt auch für die magnetischen Kraftlinien (250, 257, 258). Sie könnten also Vorgänge im Äther sein.

Daß wir sie mit gespannten Fäden vergleichen konnten (83, 87), dies war und ist fortwährend nützlich, um ihre Eigenschaften festzuhalten — was wir sogleich hervorhoben —; ihre Natur ist damit nicht enthüllt: sahen wir doch auch, daß — ganz anders als bei Fäden — längs einer und derselben Kraftlinie sehr verschiedene Zuge vorhanden sein können (88). Ernstlicher zu erwägen waren andere Analogien: Die elektrischen Kraftlinien — und auch die magnetischen, wie wir sehen werden — haben Formen, die denen von Strömungslinien, aber auch Wirbelfäden in Flüssigkeiten und Gasen in vieler Beziehung gleich sind (vgl. M 391, 399 und die Abb. 103, 104 Bd. I), und sogar in den Wirkungen sind Ähnlichkeiten vorhanden. Sollten also die Kraftlinien nicht etwa Strömungslinien oder Wirbelfäden des Äthers sein? Daß die Übereinstimmung mit Flüssigkeits- oder Gasbewegungen nicht vollkommen ist, auch wenn diese reibungslos angenommen und wenn dem Äther besondere Konstanten zugeschrieben werden, dies zeigte sich entscheidend bei Vergleichung der für die Kraftlinien einerseits und für Flüssigkeits- und Gasbewegungen andererseits geltenden allgemeinen Gleichungen[1]). Es könnten aber die elektrischen und magnetischen Kraftlinien doch besonders geartete Wirbel- und Strömungsvorgänge im Äther sein, deren Eigenart eben aus der Kenntnis von den Kraftlinien selber erst zu ergründen wäre. Auch dieser Gedanke ist durch eine Reihe von Jahren verfolgt worden. Es haben sich dabei einige Zusammenhänge gezeigt, auf die wir im später folgenden hinweisen können (256, 329); ein umfassend besseres Begreifen der Natur ist aber dabei bisher nicht erfolgt. Alle Bemühungen, innere Bewegungen im Äther zu finden, die den elektrischen und magnetischen (und damit auch den optischen) Erscheinungen entsprechen könnten und die andere als nur entfernte und nicht völlig zu klärende Ähnlichkeiten mit Flüssigkeits- oder Gasbewegungen hätten, sind erfolglos geblieben (vgl. z. B. M 394). Der Äther entzog sich überhaupt allen strengen Vergleichen mit Materie; er ist offenbar etwas unvergleichlich Anderes als alle festen, flüssigen und gasförmigen Körper. Seine unzweifelhaften Beziehungen zu den Kraftlinien bestehen — wie die Erscheinungen des Lichtes eingehend zeigten (O 4, 22) — nur darin, daß er die Geschwindigkeit der Fortbewegung von Kraftlinien regelt; er ist das raumerfüllende Etwas, gegenüber welchem die Lichtgeschwindigkeit als diese Fortbewegungsgeschwindigkeit freigelassener Kraftlinien — wie sie in den Lichtwellen vorhanden sind — gilt; dies ist auch die Eigenschaft, durch welche der Äther immer, wie schon zu Huygens' Zeit so auch jetzt, sein Dasein anzeigte und anzeigt. Auch die Geschwindigkeit der Querbewegung ungehinderter Kraftlinien an leitenden Drähten ist ganz oder nahe gleich der Lichtgeschwindigkeit (126), geltend relativ zu den auf Erde ruhenden Leitern und daher wieder relativ zum Äther der Umgebung, so wie auch für die Wirkungen von Kraftlinienbewegungen deren Geschwindigkeit relativ zum Äther

[1]) Siehe Anhang M V, Bd. I und Anhang E V b 8, Bd. IV.

maßgebend erscheint (298, 328 u. f.). Die Kraftlinien zeigen sich damit so eng verknüpft mit dem Äther, daß sie wohl treffend als Gebilde im Äther bezeichnet werden können, ohne daß aber weitere Fragen als die der Geschwindigkeitsregelung beantwortet wären.

Neue Einsicht war gekommen, nachdem unzweifelhaft gezeigt war, daß bewegte elektrische und magnetische Kraftlinien Trägheit besitzen, daß sie Masse haben (Hasenöhrl 1904, 434), die ihrem schon von Maxwell nachgewiesenen Energieinhalt zuzuschreiben ist. Danach erscheint Energie — schon seit Robert Mayer als ein in seiner Menge unveränderliches Etwas anzusehen — wie ein besonderer Stoff, der Masse und — wie sich zeigt (582) — auch Gewicht (Gravitation) hat; sie ist hiernach keineswegs mehr nur wichtige Rechengröße, sondern sie erscheint als ein zweites Ur-Ding neben dem Äther, ebensowenig unmittelbar den Sinnen zugänglich wie dieser und doch — soweit nach aller weiter noch gekommenen Erkenntnis zu sehen (583 u. f.) — vielleicht geradezu die Hauptsache in allem was vorgeht und sinnlich wahrnehmbar ist.

Hiernach erscheinen die Kraftlinien, deren Energieinhalt wir studierten (122—128), ebenfalls in neuem Lichte. Nicht Einzelheiten von materieartigen Mechanismen des Äthers sind in ihnen zu suchen, sondern als Verteilungszeichen jenes anderen Ur-Dings, der Energie im Äther erscheinen sie jetzt. Andere Energien als die in Gestalt der elektrischen und magnetischen Kraftlinien bekannten, sind aber in den Räumen außerhalb der Atome überhaupt nicht nachgewiesen (580 u. f.); daher erscheinen die Kraftlinien sogar einfach als die Energie selber, soweit sie außerhalb von Atomen sich findet. Die Eigenschaften der Kraftlinien sind damit Eigenschaften der Energie.

Die Kraftlinien geben mehr an, als nur die Dichte der Energie. Im Felde zwischen den Platten eines Kondensators z. B. ist überall gleiche Energiedichte (123), und man ersieht daraus nichts von der vorhandenen, durch die Kraftlinien ersichtlichen Kraftrichtung. Es geht daraus hervor, daß die Energie — dieses mit Masse und Gewicht versehene Etwas (434, 582) — eine gewisse, gerichtete innere Beschaffenheit haben muß, die die Kraftrichtung bedingt. Diese Beschaffenheit muß zweierlei Art annehmen können, entsprechend der elektrischen und der magnetischen Energie (273).

Der Ursprung aller Kraftlinien und damit aller Energien der großen Räume liegt aber in den Atomen, die allerdings auch nach ihrer Masse und ihrem Gewicht große Anhäufungen von Energie sind. Dieser Ursprung zeigt sich bei allen Herstellungs- und Entstehungsweisen elektrischer und magnetischer Felder. Die Elektrizitäten selbst, an welchen die elektrischen Kraftlinien hängen — sofern sie nicht frei sind —, kommen nur aus Atomen (526, 527), und das Langziehen der Kraftlienin bei Trennung der beiden Elektrizitäten aus den Atomen (vgl. 77, 208) erfolgt nur durch Zusatz neuer Energie (vgl. 23), die aber immer in Kraftliniengestalt (127) auch aus Atomen kommt (s. 486 u. f.). Auch die ohne Elektrizitäten, in Gestalt von Wellen den Raum durchziehenden, freien Kraftlinien kommen nur aus Atomen; denn sie werden entweder durch schon aus Atomen genommene Kraftlinien erzeugt (410 u. f.) oder von Atomen ausgestrahlt (W 160, 180, O 90). Endlich kommen auch alle Magnetkraftlinien aus Atomen (257); sie treten auch als Umformungen elektrischer Kraftlinien auf (328), so wie sie auch selber in elektrische Kraftlinien sich umformen können (332). Nach diesem gemeinsamen, in den Atomen liegenden Ursprung aller Kraftlinien der großen Räume zeigt sich hier, bei der geringen Kenntnis vom Atominneren, die Grenze des Wissens von den Kraftlinien und damit auch von der Energie.

II. Anfänge der Elektrodynamik, d. i. der Kenntnisse von der bewegten Elektrizität.

a) Neue Mittel.

Alle über das Vorhergehende hinaus noch bekannten Erscheinungen, auch der Magnetismus, gehören der bewegten Elektrizität an. Auch schon im Bisherigen hatten wir gelegentlich Bewegungen der Elektrizität zu betrachten, wenn auch meist nur bei den Übergängen von einem Ruhezustand zu einem anderen, und die bei der Entladung der Kleistschen Flasche beobachteten Wirkungen, wie das Erglühen von Drähten, sind bereits Erscheinungen der bewegten Elektrizität. Doch waren diese Erscheinungen von äußerst kurzer Dauer; sie erfolgten überhaupt nur nach Aufhäufung der von der Reib- oder Influenzmaschine gelieferten Elektrizitätsmengen, und in wenigen Milliontel Sekunden war der aufgehäufte Vorrat verbraucht und die Erscheinungen waren wieder vorbei. Niemals hätten die heute bekannten mannigfaltigen Bewegungserscheinungen der Elektrizität erforscht, ja kaum entdeckt und noch viel weniger zu den heute so umfassenden Anwendungen gebracht werden können, wenn nicht vor allem neuartige Elektrizitätsquellen, von viel größerer Ergiebigkeit als Reib- oder Influenzmaschinen, gefunden worden wären.

Galvanis und Voltas Arbeiten (1773—1800) haben diese neuen Quellen gebracht, die nicht — wie jene alten — einige Hundertel Coulomb in Minuten, sondern leicht ganze Coulomb in jeder Sekunde und zwar fortlaufend liefern.

130. Grundversuch. — Die Entdeckung ging aus von Beobachtungen an tierischen Präparaten, von denen bekannt war, daß sie unter dem Einfluß elektrischer Entladungen Muskelzuckungen zeigen (27). Diese Zuckungen erwiesen sich als ein äußerst empfindliches Mittel, kleinste elektrische Ladungen irgendwelchen Ursprungs nachzuweisen, viel empfindlicher als alle damaligen Elektroskope, und die Tatsache, daß Metallstücke verschiedener Art, die einander berührten, solche Zuckungen bewirkten, ließ Volta schließen, daß in den Metallstücken eine bisher unbekannte Elektrizitätsquelle vorliege.

Zu gesicherter Untersuchung mußte freilich das tierische Präparat ausgeschaltet und das Elektroskop oder Elektrometer (26, 35) benutzt werden. Es ist bewundernswert, daß dies Volta mit den damaligen Hilfsmitteln gelang, so daß er bis zu seiner „Säule" vordringen konnte. Seine Elektrometer reichten dazu freilich unmittelbar nicht aus; er kannte aber bereits den Kondensator als Spannungsvervielfältiger in der Anwendung, wie wir ihn schon betrachteten (103, Abb. 86). Will man eine geringe Spannung vervielfältigen, so teilt man sie den beiden Platten eines Kondensators mit, solange dieselben nahe beisammen sind, und hebt dann die obere Platte ab; die Spannung zwischen den beiden Platten ist dann im selben Maße vergrößert wie der Plattenabstand, und sie

kann dadurch in das Meßbereich eines sonst zu unempfindlichen Elektrometers kommen.

In dieser Weise kann Voltas Grundversuch leicht ausgeführt werden. Eine Kupferplatte Cu (Abb. 89) und eine Zinkplatte Zn sind mit isolierenden Stielen versehen, um sie als Kondensatorplatten benutzen zu können. Als trennendes Dielektrikum ist eine dünne isolierende Lackschicht vorhanden, mit der mindestens eine der beiden Platten überzogen ist. Die untere Platte kann auf ihrem Stiele feststehen und auch leitend mit der Erde verbunden sein; es wird dann die Ladung der oberen, abhebbaren Platte untersucht. Hat die letztere Platte Erdberührung gehabt und erweist sie sich, an ein Elektrometer gebracht, als ungeladen, so bleibt sie das auch nach kurzer Aufsetzung auf die untere Platte; die beiden Platten haben dabei einander auch nicht leitend berührt, was die Hauptsache ist. Nimmt man aber jetzt den kupfernen Drahtbügel a b c hinzu und bringt ihn mittels seiner isolierenden Handhaben i i so an die Platten wie es die Abbildung zeigt, wobei bei a und c metallische Berührung an blanken Stellen der Platten eintreten muß, entfernt dann den Bügel und hebt nun die obere Platte wieder ab, so gibt sie einen Ausschlag am Elektrometer, und zwar erweist sie sich, die Zinkplatte, als positiv geladen. Man kann ebenso die Ladung der Kupferplatte nach solcher Berührung mit der Zinkplatte untersuchen, und man findet sie negativ. Kupfer und Zink laden demnach einander bei der Berührung gegenseitig auf, Zink positiv, Kupfer negativ. Die Berührungsstelle ist in dem beschriebenen Versuch, wenn der Bügel wie die untere Platte aus Kupfer besteht, bei a, wo tatsächlich die beiden Metalle aneinander grenzen.

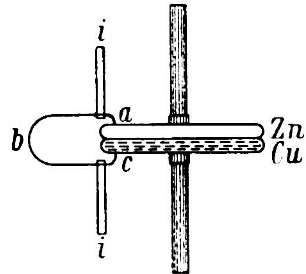


Abb. 89. Voltas Grundversuch.

Man erhält auch hier, wie bei jeder Elektrizitätsquelle, beide Elektrizitäten gleichzeitig in gleicher Menge, wie es ihrem steten Verbundensein durch Kraftlinien entspricht (77).

131. Bestimmtheit der Spannung. — Das Besondere dieser Berührungsaufladungen, die auch bei anderen Stoffpaaren eintreten, ist, daß sie stets bestimmte, der Natur der beiden Stoffe entsprechende Spannungen ergeben und zwischen den einander berührenden Körpern bestehend erhalten. Die Menge der dabei frei werdenden Elektrizität richtet sich nach dieser Spannung und nach der Kapazität der Leiter, bzw. nach dem Verbrauch bei Ableitungen. Die Mengen können demnach groß sein; die Spannungen sind aber in den meisten Fällen sehr klein; es mögen Hundertel oder Tausendtel Volt sein[1]). Man erhält in dem beschriebenen Versuch nur deshalb gut meßbare Spannungen, weil die Kapazität des benutzten Kondensators bei der großen Dünne der Lackschicht sehr groß und daher auch die Vervielfältigung der Spannung beim Abheben der Platte sehr groß ist.

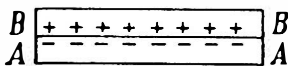
[1]) Die einwandfreie Messung der Berührungsspannungen von Metallen ist schwierig, weil leicht die trennende Schicht im Kondensator, sowie fremde Oberflächenschichten an den Metallen Berührungsspannungen hinzugeben, so daß der Versuch unrein wird.

Die Tatsache der Aufladung einander berührender Körper zu bestimmter Spannung zeigt, daß der Satz der Elektrostatik: „Die Spannung an einem einheitlichen Leiter ist beim Ruhen der Elektrizität an ihm überall gleich groß" (28), dahin aufzufassen ist, daß der „einheitliche" Leiter nicht aus verschiedenen Stoffen bestehen darf; denn wo solche aneinandergrenzen, ist ein — freilich sehr kleiner — Sprung der Spannung vorhanden. Dies ist in Zusammenfassung die Bedeutung von Voltas Entdeckung. Daß sie im einzelnen noch wesentlich weiter geht, ist alsbald zu zeigen (136, 140).

132. Berührung verschiedener Körper stets elektromotorisch wirksam; elektrische Doppelschichten. — Es sei nun gleich bemerkt, was nach Voltas Entdeckung erst langsam klar wurde, daß auch die älteste Elektrizitätsquelle, die „Reibung", nicht anders wirkt als die neue, die „Berührung". Auch bei der Reibung von Glas mit Amalgam am Leder, von Siegellack mit Fell, ist die Berührung der verschiedenen Körper das Wesentliche; die Reibung hilft nur zu besserer Berührung, sowohl was Entfernung ungünstiger fremder Schichten anlangt als auch Sicherung der Berührung an allen Punkten der geriebenen Fläche.

Man kann zeigen, daß z. B. Glas oder Glimmer bei bloßer Berührung mit Amalgam oder auch reinem Quecksilber ganz gehörige Elektrisierung erhält. Setzt man eine Glas- oder Glimmerplatte an geeignetem Halter ruhig — ohne alle Reibung — auf eine Amalgam- oder Quecksilberoberfläche, die Erdableitung habe, hebt sie dann ab und bringt sie an ein Elektroskop, so erfolgt eine deutliche Divergenz. Gelingt der Versuch nicht gleich, so erwärme man die Glas- oder Glimmerplatte vor dem Aufsetzen ein wenig, um Feuchtigkeitsschichten fortzutreiben; Reibung ist aber nicht nötig, um in diesem Fall, da gute Berührung schon durch den flüssigen Zustand des einen Körper gesichert ist, die gehörige Elektrisierung des Glases oder Glimmers zu erhalten.

Dieses gegenseitige Sichaufladen der beiden einander berührenden Körper — „elektromotorische Wirkung" genannt — besteht darin, daß sie vermöge der Kräfte ihrer Moleküle oder Atome elektrische Elementarquanten aus dem Bestande ihrer Atome miteinander austauschen. Sei es, daß positive Elektrizität vom Körper A zum Körper B (Abb. 90a) geht, oder negative von B zu A, oder beides — auf Einzelfälle kommen wir zurück —; das Endergebnis ist das gleiche (10, 11): Es bildet sich eine „elektrische Doppelschicht" an der Grenzfläche aus, eine Schicht von überschüssigen, freien positiven Elementarquanten, am einen Körper sitzend, und ihr gegenüber am anderen Körper eine Schicht von gleich vielen negativen Elementarquanten, wie es die Abb. 90a durch die Zeichen + und — schematisch darstellt. Die beiden Elektrizitäten des verschiedenen Zeichens bleiben dicht beieinander, verbunden durch ihre Kraftlinien, doch voneinander getrennt durch die besonderen Molekular- oder Atomkräfte der beiden Körper, welche Kräfte die Trennung auch hervorgebracht haben. Man kann auch sagen, die elektromotorische Wirksamkeit der beiden Körper besteht darin, daß ihren Molekülen oder Atomen verschieden große Anziehung gegenüber den Elektrizitätsquanten beiderlei Zeichens eigen ist, besonders gegenüber den leicht beweglichen negativen Elementarquanten



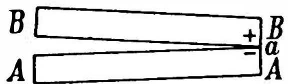


Abb. 90a (oben) und b (unten). Aufladung bei Berührung zweier verschiedener Stoffe, und Trennungsvorgang.

(Elektronen, 12, vgl. 138), und Reibungs- wie Berührungsquellen der Elektrizität sind hierin einander gleich.

133. Unterschied zwischen den alten und den neuen Elektrizitätsquellen. — Ein Unterschied zwischen den alten „Reibungs"-Quellen und Voltas neuen „Berührungs"-Quellen von Elektrizität besteht nur darin, daß bei ersteren mindestens einer der zur Berührung gebrachten Körper Nichtleiter ist (Glas, Harz usw.), während bei den letzteren beide Körper Leiter sind (z. B. Kupfer und Zink). Dies ist wesentlich für die in den beiden Fällen sich ergebenden Spannungen: Die alten Quellen geben die erheblichen, durch gröbste Elektroskope nachweisbaren, Hunderte von Volt betragenden Spannungen; die neuen Quellen geben nur die kleinen Spannungen, denen die kleine Einheit, das Volt, tatsächlich angepaßt ist.

Um einzusehen, wie dies mit der Leitung oder Nichtleitung der in Berührung gebrachten Körper zusammenhängt, bedenke man den Vorgang der Wiederabtrennung der beiden Körper A und B, die einander mit der in Abb. 90a angedeuteten elektrischen Doppelschicht versehen haben (132).

Ist mindestens einer der beiden Körper Nichtleiter, so können die beiden Ladungen der ganzen Doppelschicht getrennt werden, wie beim Abheben des Elektrophordeckels auch die Ladungen getrennt werden (22); es kann keine Rückvereinigung stattfinden, obgleich die Spannung beim Trennen wegen Sinkens der Kapazität sofort über die den Stoffen eigene, doppelschichtbildende Spannung (131) hinauswächst. Die Rückvereinigung könnte auf dem Wege über einen der letzten, beim Auseinandernehmen der beiden Flächen noch in Berührung gebliebenen Punkte stattfinden, wie dem Punkt a in Abb. 90b; die Nichtleitung verhindert aber das Hingleiten der Ladungen nach diesem Punkte, und somit bleiben die Ladungen getrennt, so daß sie mit der beim Trennen gestiegenen Spannung verwertet werden können. Das Beispiel des isoliert abnehmbaren Reibzeuges in Abb. 64 (10) hat dies für beide Ladungen auch für den Fall, daß das Reibzeug Leiter ist, gezeigt.

Sind dagegen beide Körper, A und B, Leiter, so erfolgt die Rückvereinigung am letzten Punkte noch vorhandener Berührung (a, Abb. 90 b), und es bleibt nur die sehr geringe doppelschichtbildende Spannung übrig mit entsprechend geringer Ladung, die auch bei Berührung nur an einem einzigen Punkt aufgetreten wäre. Nur mit dem beim Grundversuch beschriebenen Kunstgriff (130) ist mehr Ladung und mehr Spannung erhältlich.

Damit ist es erklärt, daß die alte „Reibungselektrizität" nur bei Nichtleitern gefunden werden konnte.

134. Wasserfall-Elektrizität. — Sehr bemerkenswert ist es, daß elektrische Doppelschichten auch an freien Körperoberflächen vorkommen, ohne daß ein zweiter Körper mitwirkt. Dies ist zuerst beim Wasser gefunden worden. Jede Oberfläche reinen Wassers trägt in der äußersten Schicht negative Ladung und etwas tiefer darunter positive, wie es Abb. 91 darstellt.

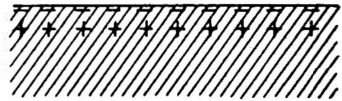


Abb. 91. Elektrische Doppelschicht an Wasseroberfläche.

Genügend schnell und plötzlich an der Oberfläche vorbeiströmende Luft reißt mit feinsten Wasserstäubchen negative Ladung aus der äußersten Schicht weg und läßt das übrige Wasser mit positiver Ladung zurück. Die feinen Wasserstäubchen verbreiten sich in der umgebenden Luft und bleiben in derselben als negative Elektrizitätsträger schweben (vgl. 514).

Man bemerkt dies bei Wasserfällen; dieselben verbreiten stets starke negative Luftelektrisierung um sich. Der Flammensammler (97) ist überflüssig zum Nachweis; es genügt, in der Nähe eines Wasserfalles ein Elektroskop hochzuheben, das einige Dezimeter nach oben gerichteten Draht trägt, um starke Divergenz mit negativem Zeichen zu erhalten. Die Abtrennung der negativen Ladung erfolgt am Fuße des Wasserfalls, wo beim Aufprallen der fallenden Wassermassen auf das untere Wasser und das feuchte Gestein die Luft plötzlich zwischen

den sich dabei vereinigenden Wasseroberflächen weggepreßt wird. Die positive Elektrizität des Wassers geht hier mit demselben zur Erde.

Man kann die Erscheinung auch im kleinen mit Wasserstrahlen hervorbringen und dabei die positive Ladung des Wassers nachweisen, wenn man dasselbe isoliert. Ein Druckbehälter D (Abb. 92), aus welchem durch ein Metallrohr r s reines Wasser in kräftigem Strahl s t ausfließt, ist isoliert aufgestellt, und das Wasser sammelt sich in einem zweiten, ebenfalls isolierten Gefäß G, das mit dem ersteren D[1]), und einem Elektroskop E leitend verbunden ist. Der Strahl fällt am besten auf eine Blechscheibe b im Gefäß G, damit er nicht Luft ins untere Wasser treibe, was teilweise Rückvereinigung der Elektrizitäten gibt, und der Strahl muß schon oberhalb der Auftreffstelle in Tropfen zerfallen sein, etwa bei t, damit möglichst viel freie Wasseroberfläche unten ankomme. Es erfolgt dann bei laufendem Strahl eine stetig zunehmende Divergenz am Elektroskop; ihr Zeichen ist positiv. Die negative Elektrizität der Luft wird durch Luftzug im Zimmer genügend weggeführt, um nicht durch Influenz auf die Behälter zu stören; es kann das auch durch einen kleinen Ventilator unterstützt werden.

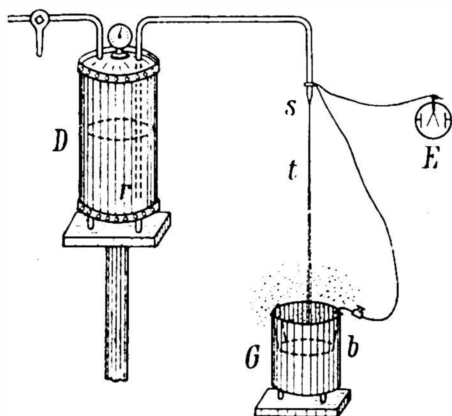


Abb. 92. Nachweis von Wasserfallelektrizität.

Auch beim Zersprühen von Flüssigkeiten mittels Luftströmen werden kleinste Flüssigkeitsteile mit ihrer Ladung aus der Doppelschicht der Oberfläche herausgerissen und als Elektrizitätsträger in der Luft verteilt, während der entstehende gröbere Flüssigkeitsstaub die entgegengesetzte Ladung enthält.

Wasser und Luft in heftiger Bewegung kommen auch in den Gewitterwolken vor. Wir haben die hierbei auftretenden Bewegungsvorgänge bereits betrachtet (M 410) und gezeigt, daß dabei auch stoßweises Zerblasen der Wasseroberfläche auftreten kann. Dieser Vorgang liefert, wie bei den Wasserfällen, feinsten Wasserstaub mit negativer Ladung, der mit dem Luftstrom weitergeführt wird, und zurückbleibende größere positiv geladene Tropfen, so daß Wolkenschichten mit Ladungen beiderlei Zeichens entstehen können. Messungen zeigten, daß hierbei aus Wassermengen, wie sie in Gewitterwolken vorkommen, Elektrizitätsmengen frei werden können, die zu Blitzentladungen genügen.

135. Elektrische Natur der Molekularkräfte. — Die Doppelschichtbildung an Flüssigkeitsoberflächen ist — wie die an Grenzflächen verschiedener Körper (132) — den Molekular- und Atomkräften zuzuschreiben. Bei den freien Oberflächen kommt die dort einseitig, senkrecht nach innen gerichtete Molekularkraft in Betracht, die wir auch als Ursache der Oberflächenspannung

[1]) Man bemerkt den Unterschied dieser Vorrichtung gegenüber dem Tropfsammler (97): Es ist bei letzterem nur das obere Wasser am Elektroskop oder Elektrometer; hier dagegen ist alles Wasser daran. Diese Vorrichtung wäre als Tropfsammler unwirksam.

der Flüssigkeiten erkannten (M 317). Daß unter Wirkung dieser Kraft die Sonderung der Elektrizitäten in eine Doppelschicht erfolgt, wie es die Wasserfallwirkung nachweist, daß also die positiv geladenen Molekülteile mehr nach innen gezogen werden als die negativ geladenen, dies ist als einer der Nachweise der elektrischen Natur der Molekularkräfte aufzufassen (vgl. M 251).

Auch sonst zeigen gleichgerichtete Anordnungen von Molekülen, wie in den Kristallen (M 249), elektrische Besonderheiten. Frische Spaltflächen von Kristallen sind meist elektrisch geladen, und es kommt vor, daß während des Spaltens kleine elektrische Entladungen der entgegengesetzt geladenen Spaltflächen in der eindringenden Luft stattfinden, die Phosphoreszenz erregen, so daß Leuchterscheinungen im Dunkeln zu beobachten sind, wie z. B. beim Zerbrechen von Zucker, Quarzkristallen und anderen kristallischen und zugleich phosphoreszenzfähigen Körpern („Trennungsleuchten“).

136. Spannungsreihe. — Wie für Kupfer und Zink erläutert (130), so untersuchte Volta auch eine Reihe anderer Leiter festen Aggregatzustandes auf ihre elektrische Berührungswirkung und zwar, so gut es ging, quantitativ. Er fand, daß diese Leiter in eine Reihe übereinander sich ordnen lassen so, daß jeder derselben gegen einen daruntenstehenden positiv, gegen einen darüber stehenden aber negativ wird und daß die Wirkung um so stärker ist, je weiter die beiden Leiter in der Reihe voneinander abstehen. Dies ist Voltas Spannungsreihe mit ihrer quantitativen Bedeutung. Es sind in der nebenstehenden Wiedergabe (Tab. 43) noch einige Elemente an den Enden der Reihe (eingeklammert) hinzugefügt, die Volta noch nicht zur Verfügung standen, bzw. die nach anderweitiger, später zu betrachtender Erfahrung (183, 472) hinzugehören.

Tab. 43.
Voltas Spannungsreihe.

+
(Li
K
Mg
Al)
Zn
] 9
Fe
] 2
Cu
] 1
Ag
Pt
Au
C
(J
Br
Cl)
—

Zur Erläuterung der quantitativen Bedeutung der Reihe sind einige Zahlen dazugesetzt, die vielleicht Hundertel oder Tausendtel Volt bedeuten können. Wenn demnach z. B. Zink gegen Eisen mit der Spannung 9 positiv wird, Eisen gegen Kupfer mit der Spannung 2, so wird Zink gegen Kupfer mit der Spannung $9 + 2 = 11$ positiv, gegen Silber mit der Spannung 12, gegen Kohle noch stärker.

Man nennt mit Volta Leiter, die nach dieser Gesetzmäßigkeit in die Spannungsreihe sich einordnen lassen, Leiter I. Klasse.

137. Leiter I. Klasse geben keine Spannungshäufung und kein dauerndes Fließen von Elektrizität. — Der in der Spannungsreihe gegebene quantitative Zusammenhang hat in zweierlei Beziehungen eine für die Anwendung der neuen Elektrizitätsquelle hinderliche Bedeutung.

Erstens nämlich lassen sich die sehr geringen Spannungen je einer Berührungsstelle zweier solcher Leiter durch Vervielfältigung der Berührungsstellen nicht steigern. Wenn z. B., wie in Abb. 93, auf eine mit der Erde verbundene Kupferplatte eine Zinkplatte gelegt ist, so hat diese die bekannte kleine positive Spannung gegen die Kupferplatte, was durch das Zeichen + bei der Zn- und 0 bei der Cu-Platte angedeutet sei; legte man aber weiter noch beliebig viele solche Plattenpaare dazu, so würde die erreichte Spannung doch immer nur wieder jene kleine mit +

bezeichnete Spannung bei jeder Zinkplatte und Null bei jeder Kupferplatte sein, und es wäre gar nichts gewonnen. Man könnte auch mit Zuhilfenahme anderer Leiter der Spannungsreihe niemals eine höhere Spannung erreichen als mit einem einzigen Paare von den Enden der Reihe; man bliebe also immer bei winzigen Spannungen.

Zweitens kann die Mengenergiebigkeit (131) der Berührung solcher Leiter nicht zu dauerndem Fließen der Elektrizität ausgenutzt werden. Denn dieses Fließen müßte ein Kreisen sein, weil Anhäufung von Elektrizität alsbald Gegenspannung und damit Stillstand ergäbe. Wenn aber beispielsweise die positive Ladung des Zinks, welches Kupfer berührt, weiter und wieder zurück zum Kupfer geleitet werden sollte und dies geschähe etwa durch Eisen, so ergäbe sich die in Abb. 94 dargestellte Spannungsverteilung mit Gleichgewicht. Die Pfeile mit Zahlen geben Richtung und Größe der Spannungen an den Berührungsstellen nach Maßgabe der Spannungsreihe an. Man sieht, daß das Zink positiv aufgeladen wird, daß aber damit Ruhezustand erreicht ist, weil keine im Kreise herum wirkende Spannung übrig bleibt, indem 11 — 9 — 2 = 0 ist, und dasselbe gilt nach der erläuterten quantitativen Bedeutung der Spannungsreihe für jeden beliebigen Kreis von Leitern aus dieser Reihe.

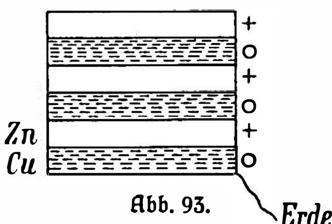


Abb. 93.

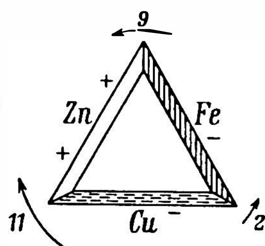


Abb. 94.

Säule nur aus Leitern I. Klasse. Keine Spannungssteigerung, kein Kreisen der Elektrizität.

Da dauerndes Fließen von Elektrizität gegen den Widerstand der Leiter dauernde Energielieferung aus dem Leiterkreis bedeuten würde (213) und da der ganze, aus Leitern I. Klasse bestehende Kreis dabei keinerlei Veränderungen erfährt, die Energieverlust bedeuteten, zeigt auch schon die allgemeine, im Energiegesetz zusammengefaßte Erfahrung, daß das dauernde Fließen in solchem Kreise unmöglich sein muß und somit auch daß die quantitative Bedeutung von Voltas Spannungsreihe genau zutreffen muß, genauer als die zugehörigen Spannungsmessungen möglich waren. Die Unmöglichkeit dauernder Stromerzeugung in diesen Leiterkreisen hört auf, wenn Energiezufuhr, etwa Wärmezufuhr, stattfindet, was wir später als „thermoelektrische Wirkung" betrachten werden (222). Für jetzt sei Wärmezufuhr ausgeschlossen, so daß alle Berührungsstellen der verschiedenen Leiter stets gleiche Temperatur haben.

138. Verhalten der Atome gegen Elektronen nach der Spannungsreihe. — Zur Frage, welche Elektrizitätsverschiebung tatsächlich stattfindet, wenn die Doppelschicht an der Grenze etwa von Zink und Kupfer sich ausbildet (vgl. 132), kann nach aller Kenntnis gesagt werden, daß hier, wie bei aller Elektrizitätsbewegung in Metallen (13), nur Übertritt von Elektronen, nicht von positiven Elementarquanten in Betracht kommt. Demnach bedeutet das Positivwerden des Zinks gegen Kupfer, daß Elektronen, die den Atomen des Zinks angehören, hinübertreten zum Kupfer. Ganz allgemein kann man sagen: die Atome der in der Spannungsreihe oben stehenden Elemente verlieren leichter Elektronen als die der unten stehenden, oder auch: die Atome der untenstehenden Elemente halten stärker Elektronen fest als die der obenstehenden. Deshalb werden auch die Atome der obenstehenden Elemente leicht mit positiver Ladung, d. h. mit verlorenen Elektronen vorgefunden und die der untenstehenden leicht negativ geladen, d. h. mit aufgenommenen und festgehaltenen überschüssigen Elektronen. Dementsprechend werden die obenstehenden Elemente auch „elektropositiv" oder von „elektropositivem Charakter" genannt, die untenstehenden „elektronegativ".

Dieses Verhalten der verschiedenen Atome wird uns in anderen Erscheinungs-

formen noch wiederholt begegnen, und wir kommen dann darauf und auf die Spannungsreihe zurück (183, 472, 510).

139. *Leiter II. Klasse.* — Ebenso wie die Metalle im Grundversuch (130) untersuchte Volta auch *flüssige Leiter*, wie verdünnte Säuren, Basen und Salzlösungen, mit denen er poröses Holz oder Papier tränkte, um sie in Plattenform zu bringen. Er fand, daß dieselben in Berührung mit Metallen ebenfalls elektrisch werden und zwar zum Teil sogar viel stärker als die Metalle untereinander; außerdem zeigte sich aber, daß die *Flüssigkeiten nicht in die Spannungsreihe passen.* Beispielsweise wird verdünnte Schwefelsäure stark positiv bei der Berührung mit Zink, wonach sie in der Spannungsreihe über Zink zu stellen wäre; dann müßte sie aber mit Kupfer noch viel mehr positiv werden als mit Zink, und dies ist nicht der Fall: sie wird mit Kupfer nur ganz schwach positiv. Volta nannte diese flüssigen Leiter, *die nicht in die Spannungsreihe passen, Leiter II. Klasse.*

Das Herausfallen der Leiter II. Klasse aus der Spannungsreihe hat zwei wichtige, sogleich zu betrachtende Folgen (140, 141).

140. *Die Säule.* — Erstens gelingt es mit Zuhilfenahme dieser Leiter, die *schwachen Spannungen* der einzelnen Berührungsstellen *zu vervielfältigen.*

Es sei (Abb. 95) auf eine Zinkplatte ein mit verdünnter Schwefelsäure getränkter Lappen als plattenförmiger Leiter II. Klasse gelegt und darauf eine Kupferplatte, und es seien noch weitere solcher Gruppen zu je 3 Platten (deren die Abbildung drei zeigt) aufeinandergeschichtet zu einer säulenförmigen Anordnung: *Voltas Säule.* Die einzelne Gruppe (in der Abbildung mit Klammer versehen) wird *Element der Säule*, auch kurz „*Element*" genannt.

Abb. 95.

Abb. 96.

Volt s Säule. Spannungssteigerung und dauerndes Kreisen der Elektrizität.

Wir betrachten nun die Spannungen an der Säule. Die unterste Zinkplatte sei leitend mit der Erde verbunden, so daß sie Spannung 0 gegen Erde hat. Die Schwefelsäure nimmt gegen die Zinkplatte und also auch gegen Erde eine positive Spannung von ungefähr 1 Volt an, was durch das Zeichen + in der Abbildung angedeutet ist; die dann folgende Kupferplatte ist nur wenig negativ gegen die Schwefelsäure, so daß sie eine nur wenig niedrigere Spannung hat als diese, d. i. auch noch fast 1 Volt Spannung gegen Erde. Da nun die Zinkplatte des zweiten Elementes folgt, die gegen Kupfer positiv ist, steigt die Spannung sogar wieder und es beginnt demnach das zweite Element schon mit der Spannung von rund 1 Volt, während das erste mit Null begonnen hat; die Spannung ist bei der Rückkehr zum selben Stoff nicht wieder zur Ausgangsspannung zurück-

gekehrt, wie es bei der nur aus Leitern der I. Klasse bestehenden Säule der Fall war (137, Abb. 93). Damit ist der Erfolg der Spannungsaufhäufung in der neuen Säule schon ersichtlich. Die Schwefelsäure des zweiten Elements bringt wieder 1 Volt hinzu, in der Abbildung durch Verdoppelung des Zeichens + angedeutet, und weder das Kupfer noch das folgende Zink ändert daran wesentliches; ebenso erfolgt für jedes weitere Element eine Spannungssteigerung von rund 1 Volt.[1])

Man erhält also am oberen Ende der Säule soviel Volt Spannung gegen das untere Ende — oder, bei Erdableitung desselben, gegen Erde — als die Säule Elemente hat. Schichtet man 50 Elemente aufeinander, so kann man an einem einigermaßen feinen Aluminiumblatt-Elektroskop schon unmittelbar, ohne Kondensator, die Spannung von 50 Volt als deutliche Divergenz sehen. Dabei kann man sich gleichzeitig von der großen Mengen-Ergiebigkeit dieser neuen Elektrizitätsquelle überzeugen, wenn man die Leitung vom isolierten Ende der Säule zum Elektroskop mit der Hand berührt; ist die Säule in gutem Stand, so vermindert dies kaum merklich die Divergenz am Elektroskop: Was durch die Hand zur Erde abfließt, wird durch die Säule sofort wieder ersetzt. Isolationsverluste sind bei diesen mengenreichen Elektrizitätsquellen kaum mehr zu befürchten; an die Stelle von Glas oder gar Bernstein kann jetzt Holz als meist genügender Isolator treten.

141. Zum Kreise geschlossenes Element. — Zweitens ist es mit Hinzunahme der Leiter II. Klasse möglich, dauerndes Fließen von Elektrizität zu erhalten. Schon das einzelne Element von Voltas Säule zeigt dies. Man betrachte den Kreis der 3 Stoffe dieses Elements, Abb. 96, mit den durch Pfeile gekennzeichneten Spannungen an den 3 Berührungsstellen. Die große Spannung zwischen Zink und Schwefelsäure überragt so weit die kleinen Spannungen an den anderen Berührungsstellen, daß dauernder Antrieb in der Richtung dieser ersteren Spannung auf die positive Elektrizität wirkt, wonach sie dauernd in dieser Pfeilrichtung kreisen kann, die negative in der entgegengesetzten.

Dies war die folgenschwerste Entdeckung Voltas, auf welcher alles weitere, die ganze Entwickelung der Elektrodynamik und aller ihrer Anwendungsmöglichkeiten beruht. Es war zum erstenmal möglich geworden, die Erscheinungen fließender Elektrizität mit Sicherheit hervorzubringen und zwar dauernd, sie großenteils überhaupt erst kennenzulernen und sie alle in reinen Versuchen, unvermischt mit den Erscheinungen hoher Spannung zu studieren.

142. Andere Formen der Elemente. — Volta prüfte nicht nur noch andere Leiter I. und II. Klasse für seine Säule, sondern er führte auch schon Elemente in Becherform ein. Jedes Element besteht dabei aus einem Gefäß, das den flüssigen Leiter II. Klasse enthält, in welchen die beiden Platten der Leiter I. Klasse tauchen ohne einander zu berühren. Diese Elemente werden dann zur Summierung der Spannungen zu einer „Kette“ verbunden (Abb. 97). Diese Form ist leichter zuverlässig instand zu halten als die Säulenform und

[1]) Wir werden die Spannung des Volta-Elements (Zink-Schwefelsäure-Kupfer) der Einfachheit halber stets zu 1 Volt annehmen; genauer beträgt sie nahe 0·9 Volt bei schonender Benutzung (vgl. 146, 210).

geeigneter für stärkere Wirkung. Sie hat durch viele Jahre zu den grundlegenden Untersuchungen über bewegte Elektrizität gedient; Davy, Berzelius, Örsted, Ampère, Ohm und Faraday haben sie benutzt.

Als Flüssigkeit eignet sich am besten die verdünnte Schwefelsäure; wenn man aber nur die Spannung benutzt und nicht viel Elektrizität abnehmen will, kann man fast jede beliebige verdünnte Säure oder Salzlösung nehmen; ja selbst gewöhnliches Wasser mit Zink- und Kupferplatte gibt eine Spannung von ungefähr 1 Volt für jedes Element („Wasserbatterie").

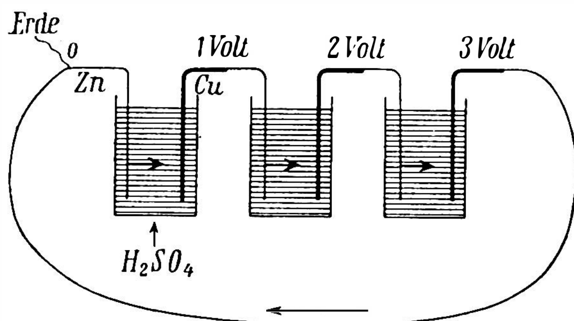


Abb. 97. Voltas Elemente in Becherform, zur Kette verbunden.

143. Als Sitz der Spannung in den Elementen betrachten wir stets die Berührungsfläche des Zinks (bzw. sonstigen elektropositiven Leiters I. Klasse) mit dem Leiter II. Klasse; dies ist der Ort, wo die positive Elektrizität von ersterem Leiter in den zweiten hineingetrieben wird, was die Pfeile in Abb. 97 andeuten sollen. Die anderen Berührungsstellen verschiedener Leiter tragen nicht viel bei, wie wir bereits gesehen haben (140); die Leiter I. Klasse würden außerdem für sich allein sogar niemals dauerndes Fließen der Elektrizität ergeben (überall gleiche Temperatur vorausgesetzt), wie ebenfalls bereits gezeigt (137). Wir dürfen aus diesen beiden Gründen alle diese Berührungsstellen meist ganz außer acht lassen.

Stets ist das Kupfer des Elements positiv, das Zink negativ elektrisch (somit umgekehrt wie im Grundversuch, beim Fortlassen des Leiters II. Klasse, 130).

Den Ursprung der Spannung untersuchen wir später (149, 205).

144. Als eine besondere Form der Säule sei die „Trockensäule" erwähnt. Das Element derselben besteht aus unechtem Gold- und Silberpapier, beide mit der Papierseite aneinandergeklebt. Das immer etwas Feuchtigkeit haltende Papier spielt hier die Rolle des getränkten Lappens und die Belage wirken als Leiter I. Klasse. Eine Säule von 1000 solchen Elementen kann 100 Volt oder mehr geben und gut als Spannungsquelle heterostatischer Elektrometer (36) dienen.

145. Die belebte Natur scheint Leiter I. Klasse ganz aus nichtmetallischen Stoffen zu bauen; die Zitteraale und Rochen entwickeln jedenfalls Spannungen von einigen 100 Volt mittels Organen, die Voltasche Säulen sein könnten.

146. Voltas Elemente erweisen sich bei längerer Elektrizitätslieferung allmählich abnehmend in der Wirkung. Wir gehen hierauf und auf die abhelfenden „konstanten" Elemente später ein (210).

b) Allgemeine Kenntnisse über elektrische Ströme.

147. Die Spannungen in der Kette. — Verbindet man die Enden einer Voltaschen Kette (142) durch einen Leiter, wie es in Abb. 97 angedeutet ist, so findet dauerndes Fließen der Elektrizität in diesem Leiter statt.

Es entspricht dies dem dauernden Vorhandensein der Spannung, welche die Elektrizität treibt (25 u. f.), wie wir es schon beim Leiterkreise eines einzelnen Elementes betrachteten (141, Abb. 96).

Der „Strom ist jetzt geschlossen", wie man sagt, statt „der Leiterkreis der Stromquelle ist geschlossen"; eine gekürzte Ausdrucksweise, ebenso wie das „Öffnen des Stromes", die wir oft benutzen werden.

Jedes Element der Kette wirkt bei geschlossenem Strome — wenn wir wieder Spannung mit Druck (29) und Elektrizität jetzt etwa mit Wasser vergleichen — wie eine Pumpe, die eine gewisse Druckstufe selbsttätig dauernd aufrechterhält (131) — 1 Volt für jedes Element, es könnte 1 Atm. für Wasser sein —, und die Druckstufen addieren sich bei den richtig, wie in Abb. 97 zusammengeschalteten Elementen, und unter dem Gesamtdruck, 3 Volt in der Abbildung, strömt dann dauernd die Elektrizität durch den Leitungsdraht zurück zum Orte niedrigeren Druckes.

Dabei ist es gleichgültig, welche Stelle des Leiterkreises etwa mit der Erde verbunden ist (nur dürfen es nicht 2 oder mehr Stellen sein, weil dies Seitenwege für den Abfluß der Elektrizität gäbe). Es ist in der Abb. 97 das linke Ende der Kette mit der Erde verbunden, wodurch die angeschriebenen Spannungen gegen Erde bedingt sind. Würde man das rechte Ende der Kette erden, so wären von rechts nach links die Spannungen 0, —1 Volt, —2 Volt, —3 Volt gegen Erde anzuschreiben, wobei das negative Zeichen negative Aufladung der betreffenden Stellen und damit Weggetriebenwerden negativer Elektrizität von dort nach der Erde hin bedeutet. Es würde aber wieder, genau wie vorher, die (positive) Spannung von links nach rechts in der Kette ansteigen und also wieder derselbe Antrieb der positiven Elektrizität in gleicher Richtung und Stärke längs des die Kette schließenden Leiters vorhanden sein. Es kommt, wie man sieht und wie es der Definition der Spannung entspricht, für das Fließen der Elektrizität immer nur auf Spannungsunterschiede in der Leitung an, durch welche die Elektrizität fließen soll — wie es beim Wasser nur auf die Druckunterschiede in den Röhren ankommt —, nicht auf die Höhe der Spannungen gegen einen außerhalb des gegebenen Weges der Elektrizität gelegenen Punkt, wie z. B. gegen Erde. Ist gar keine Erdableitung vorhanden, so ist das Fließen der Elektrizität in dem Kreisweg davon ganz unberührt; nur würden dann die Spannungen seiner verschiedenen Stellen gegen Erde unbestimmt, nämlich von zufälliger Erdberührung abhängig sein.

148. Der elektrische Strom. — Eine Schwierigkeit bei der Verfolgung des Fließens der Elektrizität im gegebenen Leitungsweg besteht darin, daß der Leiter beide Elektrizitäten enthält, die von der jeweils vorhandenen Spannung in entgegengesetzten Richtungen getrieben werden. Dies wirkt verwirrend; denn es beraubt den Vorgang des eindeutigen Richtungssinnes, wie ihn ein Wasser- oder Gasstrom in Röhren hat, wozu noch kommt, daß, wie schon bemerkt, das Genauere über die Elektrizitätsbewegungen gerade in den am meisten in Betracht kommenden, metallischen Leitern wenig bekannt (11, 13) und wohl ziemlich verwickelt ist (vgl. 85, 86).

Diese Schwierigkeit hat Ampère beseitigt durch die Einführung des Begriffes „elektrischer Strom" (1820) als eines gedachten einfachen Vorganges, bestehend in Bewegung von nur positiver (Glas-) Elektrizität (7) in somit eindeutig bestimmter Richtung in gegebener Menge in der Zeiteinheit durch den Querschnitt des Leiters. Unsere Pfeile in den Abbildungen werden stets die so definierte Stromrichtung anzeigen. Daß dieser gedachte einfache Vorgang des „Stromes", mit welchem leicht zu überlegen und zu rechnen ist, in allen den wohlstudierten Wärmewirkungen und magnetischen Wirkungen bewegter Elektrizität vollkommener Ersatz ist für die in Wirklichkeit meist sehr verwickelten

Vorgänge der Elektrizitätsbewegung in Leitern, dies kann um so mehr verwundern, als die Vorgänge von Fall zu Fall auch sehr verschiedenartig sein können — in Metallen, Elektrolyten, Gasen —; doch hat die fortschreitende Erfahrung aufs eingehendste unzweifelhaft die Vollkommenheit des Ersatzes für alle drei Fälle gezeigt, was wir noch im einzelnen nachweisen werden (214, 215, 297). Es liegt hier ein besonderes bemerkenswertes Stück Einfachheit der Natur vor, erfaßt durch passende Begriffe. Alle noch folgenden Überlegungen werden dadurch sehr abgekürzt.

Selbstverständlich steht es stets frei zu bedenken, ob wirklich positive Elektrizität in der „Strom"richtung (z. B. in der Pfeilrichtung von Abb. 97) bewegt ist, oder ob es eine ebenso große Menge negativer Elektrizität in der entgegengesetzten Richtung ist oder auch ob ein Teil des Stromes in dem einen Vorgang, der Rest in dem anderen besteht, was alles denselben „Strom" bedeuten würde. Daß gerade in den meist vorkommenden metallischen Leitern nach aller Kenntnis nur die negative Elektrizität in Gestalt freier Elektronen auf lange Strecken fortbewegt sein kann, wurde schon öfter erwähnt (13, 85) ebenso wie die meist ununterscheidbare Gleichwertigkeit entgegengesetzt gerichteter Bewegungen der beiden Elektrizitäten (11). Wir untersuchen später auch die tatsächlichen Elektrizitätsbewegungen in den flüssigen Leitern (Elektrolyten) und den Gasen (171 u. f., 503 u. f.), wovon im sogleich folgenden teilweise schon Gebrauch gemacht wird.

149. Ursprung der Spannung in den Elementen. — Es ist in den Leitern II. Klasse bei Stromleitung sowohl positive als auch negative Elektrizität fortbewegt (186). In diesem Falle ist Materie (in Gestalt der Jonen) die Trägerin der Elektrizität; es wandern mit der Elektrizität Atome, und dies bedeutet chemische Veränderungen. Solche Veränderungen kommen dementsprechend auch in der Stromquelle, im Leiter II. Klasse von Voltas Elementen vor. Wir sagten (143), daß der Sitz der Spannung dieser Elemente die Berührungsfläche des Zinks mit der verdünnten Schwefelsäure sei, d. h. daß an dieser Fläche dauernd positive Elektrizität vom Zink in die Flüssigkeit getrieben wird (wie es die Pfeile in der Abb. 97 darstellen), und dies geschieht dadurch, daß positiv geladene Zinkatome aus der Zinkplatte in die Flüssigkeit übertreten: Es ist der Auflösungsvorgang des Zinks in der Schwefelsäure, der dieselbe positiv aufládt und immer positiv geladen hält, solange Zink und Säure einander berühren. Die positive Ladung der Zinkatome besteht darin, daß sie Elektronen verloren haben, in welchem Zustand sie schon im festen Metall sich finden (vgl. 13), entsprechend dem elektropositiven Charakter des Zinks (138); elektrisch neutrale Zinkatome gehen nicht in Lösung. Wir untersuchen auch diesen Vorgang später noch eingehender (205). Ist statt der Säure Wasser vorhanden, so findet ebenfalls Lösung von Zink statt, nur in außerordentlich viel geringerem Maße; dementsprechend liefert auch die Wasserbatterie (142) zwar nahe 1 Volt für jedes Element, aber Stromentnahme erschöpft sie für längere Zeit.

Da bei der Auflösung von Zink chemische Energie verloren geht, ähnlich wie bei der Verbrennung von Zink (W 126 u. f.), so ist ersichtlich, daß der bei dieser Auflösung gelieferte elektrische Strom Energieleistungen vollbringen kann, die in seinen alsbald zu betrachtenden Wirkungen (153) liegen, und daß somit kein Widerspruch mit dem Energiegesetz vorliegt, was wir später noch eingehender nachweisen (206, 207).

150. Man sieht hier den Unterschied zwischen der Berührungswirkung von Leitern I. Klasse untereinander einerseits und mit Leitern II. Klasse andererseits. Im ersteren Falle findet nur Übertritt von Elektronen statt (13), nicht von Materie; die Stoffe erleiden keine chemische Änderung und geben keine dauernden Ströme (137). Im zweiten Falle findet Übertritt von Atomen statt, was chemische Änderung bedeutet und entsprechend andauernde Stromlieferung ergibt.

151. Stromstärke; Stromeinheit. — Nach der Bedeutung des „elektrischen Stromes" (148) ist die „Stärke" oder „Intensität" des Stromes, oder kurz „der Strom" gegeben durch die Elektrizitätsmenge, die in der Zeiteinheit durch den Leiterquerschnitt geht:

$$\text{Stromstärke} = \frac{\text{Elektrizitätsmenge}}{\text{Zeit}} \qquad 151)$$

oder in den gewöhnlich gebrauchten Zeichen $J = \frac{e}{t}$, wobei Menge und Zeit, e und t, zusammengehören müssen.

Danach ist die Einheit der Stromstärke oder die Stromeinheit mit der Mengeneinheit, dem Coulomb (15), durch die Zeiteinheit, die Sekunde, verbunden. Diese Stromeinheit wird „Ampère" oder „Weber" genannt — A. M. Ampère bzw. W. Weber zu Ehren[1]) — und es ist somit 1 Ampère oder 1 Weber derjenige elektrische Strom, welcher 1 Coulomb in 1 sek durch den Leiterquerschnitt führt, oder

$$1 \text{ Weber} = \frac{1 \text{ Coulomb}}{1 \text{ sek}}\,. \qquad 151\text{a})$$

Das Weber gehört, wie das Coulomb, zum absoluten elektromagnetischen Einheitssystem, auf dessen Begründung wir später eingehen (264 u. f.). Es sei hier nur bemerkt, daß der Aufbau dieses Systems (vgl. Abb. 17 Bd. IV) zuerst zum Weber führt und von diesem aus zur Webersekunde, dem Coulomb.

Das Weber hat eine für die Ströme Voltascher Elemente ganz passende Größe; man erhält leicht einige Weber von solchen Elementen, wenn sie nicht zu klein sind. Daß dies eine große Mengenlieferung ist, geht aus der Größe des Coulomb hervor (vgl. 15); allerdings erfolgt diese Lieferung aus den Elementen ohne Aufhäufung, nur im Kreise herumgetrieben. Eine nicht zu kleine Influenzmaschine kann die im Beispiel von 121 aufgehäuft berechneten 0·004 Coulomb in 40 sek liefern; verbindet man ihre Kugeln durch einen Draht, so fließt also in demselben ein Strom von nur 0·0001 Weber.

Ob positive Elektrizität nach der einen Seite oder negative nach der anderen Seite durch den Querschnitt fließt, ist für die Berechnung der Stromstärke gleichgültig (148). Findet beides gleichzeitig statt, so sind daher die Mengen ohne Rücksicht auf das Zeichen zu addieren. Das Vorzeichen der Stromstärke, welches die Richtung des Stromes im gegebenen Leiter bestimmt, ist nach Festsetzung (148) positiv in Bewegungsrichtung der positiven Elektrizität.

152. Die Stromstärke muß in allen Teilen eines einheitlichen Stromkreises bei dauernd gleichförmigem Fließen des Stromes die gleiche sein. Denn wenn durch die verschiedenen Querschnitte des Kreises

---

[1]) Wir werden den Namen „Weber" benutzen in der Meinung, daß der beliebige Gebrauch beider Namen nicht schaden könne, daß aber dadurch eine Schuld an Wilhelm Weber abgetragen wird; vgl. den Anhang E I.

gleichzeitig verschiedene Elektrizitätsmengen flössen, würde Stauung der Menge stattfinden, was zunehmende Spannungen ergäbe, die das Fließen ungleichmäßig oder gar rückgängig machen müßten.

153. Wirkungen elektrischer Ströme. — Von den im Vorhergehenden überlegten Elektrizitätsbewegungen in Leiterkreisen ist unmittelbar für gewöhnlich nichts zu bemerken. Unter geeigneten Umständen treten aber besondere Symptome der verborgenen Vorgänge auf, die auf diese schließen lassen; es sind das die besonderen Wirkungen bewegter Elektrizität — Stromwirkungen —, die mit Voltas Kette entdeckt wurden und die zuletzt in die bekannten, sehr allgemeinen Anwendungen kamen. So vielartig diese Wirkungen scheinen mögen, sind sie doch nur von dreierlei Art: Chemische Wirkungen, Wärmewirkungen, magnetische Wirkungen.

Die chemischen Wirkungen bestehen in Zersetzung flüssiger Leiter bei Stromdurchgang.

Die Wärmewirkungen haben wir schon bei den kurzdauernden Strömen der Flaschenentladungen bemerkt (117); sie treten bei den neuen Stromquellen dauernd auf. Ist der Schließungsdraht einer Voltaschen Kette genügend dünn, so glüht er, solange der Strom geschlossen bleibt, bis zur endlichen, infolge chemischer Wirkungen in der Kette selbst eintretenden Erschöpfung derselben.

Die magnetischen Wirkungen zeigen sich in der Umgebung der Strombahn durch Kräfte auf dort befindliche Magnete.

Die chemischen und magnetischen Wirkungen wurden mittels Voltas Säule entdeckt; sie waren mit den Elektrisiermaschinen zu schwach, um vorher erkannt zu werden. Als Stromwirkungen sind sie durch die im Strom fließende Menge in der Zeiteinheit bestimmt; sie müssen daher nach den schon vergleichsweise angegebenen Stromstärken (151) beim einfachsten, kleinsten Voltaschen Element vieltausendmal stärker auftreten als bei einer großen Influenzmaschine[1]). Daß sie mit der letzteren im entsprechend geringen Maße ebenfalls nachweisbar sind, läßt sich mit heutigen Hilfsmitteln leicht zeigen. Der erste Nachweis hiervon war einst wichtig zur Sicherstellung der Einheitlichkeit aller Elektrizität (Faraday 1833). Es verschwanden dann allmählich die naturwidrigen Ausdrücke „Reibungselektrizität", „Influenzelektrizität", „Galvanische" oder „Voltasche" oder „Kontaktelektrizität".

Wir werden die drei Stromwirkungen einzeln eingehend studieren und zwar die chemischen und die Wärmewirkungen in diesem Bande (171 u. f., 212 u. f.), die magnetischen Wirkungen, deren Kenntnis die vollständige Elektrodynamik eröffnete, im IV. Bande (276 u. f.). Vorerst ist im Nächstfolgenden Allgemeineres zu behandeln.

154. Menge und Spannung bei den alten und den neuen Elektrizitätsquellen. — Der großen Mengenergiebigkeit von Voltas neuen Elektrizitätsquellen stehen die geringen Spannungen gegenüber, die sie liefern. Bei den alten Quellen ist es umgekehrt: sie liefern kleine Mengen[2]) bei hoher Spannung. Keines der Elemente, auch neuerer Einrichtung, hat wesentlich mehr als 2 Volt Spannung, während die Influenzmaschine leicht 1 Million

[1]) Die Beschränktheit der Mengen der Reib- und Influenzmaschinen liegt darin, daß alle zu liefernde Elektrizität auf der rotierenden Scheibe mittels mechanischer Übertragung befördert werden muß. Bei Voltas Elementen fließt sie auf ihrem ganzen Kreiswege in Leitern, die große Mengen in kurzer Zeit zu befördern vermögen.

[2]) Vgl. vorige Fußnote.

Volt liefert. Es treten daher bei den alten Quellen mehr die Spannungserscheinungen, bei den neuen mehr die Stromerscheinungen in den Vordergrund.

Die Mengen der gelieferten elektrischen Energie brauchen bei den beiden Quellen nicht verschieden zu sein; denn die Energie ist durch das Produkt aus Menge und Spannung bestimmt (119), so daß es gleichgültig ist, welcher der beiden Faktoren groß ist.

Man kann die beiden Elektrizitätsquellen mit „Wasserkräften" vergleichen, wobei Elektrizitätsmenge mit Wassermenge und Spannung wieder mit Druck in Vergleich kommt (29). Die alten Quellen gleichen dann dem Sturzbach in den Alpen, der wenig Wasser, aber von 1000 und mehr Meter Höhe, also mit großem Druck zur Verfügung stellt; die neuen Quellen gleichen einem breiten, wasserreichen Fluß, der aber nicht viel Gefälle hat, also nicht viel Wasserdruck liefert. Die Energielieferung kann auch hier, als Produkt aus Volum und Druck (M 377), die gleiche sein, wenn auch anders zusammengesetzt.

155. Strommessung; Galvanometer. — Stromstärken sind unmittelbar nach Definition (148, 151) nicht meßbar, weil die in den Leitern kreisenden Elektrizitätsmengen nicht unmittelbar wahrnehmbar sind. Wohl aber kann man Stromstärken durch alle drei genannten Wirkungen (153) messen, nachdem nur die Überzeugung gewonnen ist, daß und wie die Wirkungen richtig mit den Elektrizitätsmengen zusammenhängen. Diese Überzeugung war erst allmählich erreichbar.

Am ehesten schien von vornherein die magnetische Wirkung geeignet zu einer Strommessung, indem man die auf den Pol einer beim Stromleiter befindlichen Magnetnadel ausgeübte Kraft proportional der Stromstärke annahm. Dies war naheliegend, weil diese Kraft ihre Richtung umkehrt, wenn die Stromrichtung umgekehrt wird, was anzeigt, daß die Kraft keiner geraden (etwa der zweiten) Potenz der Stromstärke proportional sein kann, wohl aber der 1. Potenz, also der Stromstärke selbst. Diese einfachste Möglichkeit hat sich als der Wirklichkeit entsprechend gezeigt, wie später nachzuweisen ist (299) und wie es immer zutrifft, wenn nur die benutzten Begriffe gut der Wirklichkeit angepaßt sind.

Man nennt eine Vorrichtung zur Strommessung mittels magnetischer Wirkung „Galvanometer". Abb. 98 zeigt ein einfaches Galvanometer in Vorder-

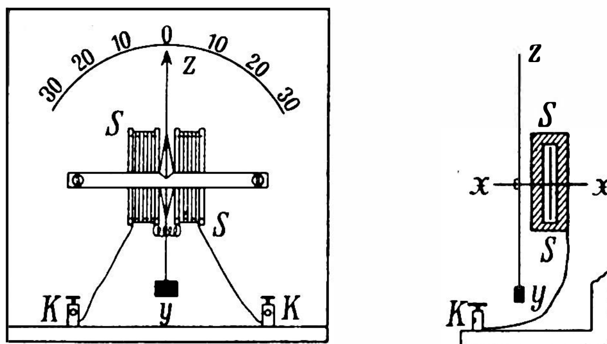


Abb. 98. Einfaches Galvanometer.

ansicht und in den Hauptteilen auch von der Seite. Der zu messende Strom fließt durch die Klemmschrauben k k ein und aus, zwischen welchen ihm der Weg durch einen mittels Umspinnung isolierten Draht gegeben ist, der in einer Anzahl

von Windungen um die zweiteilige Spule S S gelegt ist. In der Höhlung dieser Spule ist eine Magnetnadel (in den Abbildungen ohne Bezeichnung sichtbar) um die Achse x x frei beweglich; sie wird durch das kleine, am Arm y z an der gleichen Achse sitzende Gewicht y vertikal gehalten[1]); z wirkt als Zeiger für die Drehungen der Nadel, zur Ablesung der Stromstärke. Wenn nämlich Strom durch die Drahtwindungen der Spule fließt, erfahren die beiden Pole (Enden) der Nadel Kräfte parallel der horizontalen Spulenachse und zwar in entgegengesetzten Richtungen, so daß die Nadel horizontal zu stehen käme, wenn nicht das Gewicht y Gleichgewicht in einer Zwischenlage gäbe. Der am Zeiger z abzulesende Abstand dieser Gleichgewichtslage von der Nullage ohne Strom, die „Ablenkung", ist, solange sie klein ist, nahe proportional der Kraft auf die Pole in der Spule und damit — wie später nachzuweisen — der Stromstärke. Bei größeren Ablenkungen ist, wie die Anwendung des Kräfteparallelogramms zeigt, richtiger die trigonometrische Tangente des Ablenkungswinkels das Maß der Kraft und damit der Stromstärke, ähnlich wie es in exakter Weise bei der Tangentenbussole zur Durchführung kommt (288).

Umkehr der Stromrichtung, erreichbar durch Vertauschung der Zu- und Ableitungsdrähte an den Klemmen k k oder durch leichtverständliche „Stromwender" gibt die gleiche Ablenkung nach der anderen Seite, so daß sowohl Stärke als Richtung des Stromes am Zeiger ersichtlich werden.

In solcher Weise war die Strommessung vorläufig gegeben, und es konnten die allgemeinen Gesetze des Stromlaufs ergründet werden.

Hat man ein richtiges Kennzeichen für die Stromeinheit, das Weber — wovon später (293) —, so kann das Galvanometer auch in Weber geeicht oder seine Skale unmittelbar in Weber eingeteilt werden; es kann dann auch Webermesser (Ampèremeter) genannt werden.

156. Ohms Gesetz. — Es ist immer wichtig zu wissen, wie stark der Strom mit allen seinen Wirkungen sein wird, der unter gegebenen Umständen beim Schluß eines Leiterkreises entsteht. G. S. Ohm hat diese Frage eingehend experimentell studiert (1827).

Vor allem muß die Stromstärke von der Spannung abhängen, die den Strom treibt; denn die Spannung ist — ihrer Bedeutung nach (25) — die Ursache des Stromes. Es trifft hier wieder das einfachste Mögliche zu: die Stärke des Stroms ist bei gegebenem Leiterkreise proportional der ihn treibenden Spannung.

Bei den Elementen als Stromquellen ist die Spannung durch die Natur der einander berührenden Stoffe bedingt (131) und ist daher meist zum voraus bekannt, jedenfalls nach Messungen mit dem Quadrantelektrometer (36) ermittelbar. Diese dem Element eigene Spannung, der Spannungsunterschied, welchen es zwischen seinen Enden liefert, wird auch seine „Elektromotorische Kraft" genannt. Tab. 48 gibt die elektromotorischen Kräfte einer Anzahl gebräuchlicher Elemente an, die wir später behandeln werden (210). Schaltet man mehrere Elemente mit gleicher Spannungsrichtung hintereinander, wie in Abb. 97, so

[1]) Um nur dieses Gewicht allein wirken zu lassen und den Erdmagnetismus auszuschalten, kann noch eine zweite Magnetnadel mit verkehrten Polen außerhalb der Spule längs y z angebracht sein (vgl. 296).

wirkt die Summe der Einzelspannungen als gesamte, den Strom treibende elektromotorische Kraft (147). In jedem Falle, auch wenn Gegeneinanderschaltungen von Stromquellen vorkommen, ist die Summe mit den Vorzeichen zu nehmen.

Vergleicht man die strömende Elektrizität in Drähten mit strömender Flüssigkeit in Röhren, wobei Spannung wieder mit Druck in Vergleich kommt (29), so sieht man, daß die Elektrizitätsbewegung einfacher sich verhält als die Flüssigkeitsbewegung; denn die durch Röhren strömenden Flüssigkeitsmengen in der Zeiteinheit sind nicht stets einfach proportional den treibenden Druckunterschieden, sondern es finden beim Auftreten von Wirbelbewegung bedeutende Abweichungen hiervon statt (M 405), die bei der Elektrizitätsbewegung fehlen.

Die Proportionalität von Stromstärke und Spannung bedeutet, daß die Geschwindigkeit der Fortbewegung der im Leiter vorhandenen, beweglichen Elektrizitätsquanten proportional der sie treibenden Kraft ist, welche durch die Spannung gegeben ist, wie es der quantitativen Bedeutung der Spannung (30) entspricht.

Außer von der Spannung ist aber die Stromstärke noch von der Beschaffenheit des Leiterkreises abhängig, und die hierfür maßgebende Gesamtangabe wird der „Widerstand" des Leiterkreises genannt. Es ist der neue Begriff des „Widerstandes", dessen Erfassung mit seinen Abhängigkeiten und seinen Gesetzen Ohms besonderes Verdienst ausmacht.

Hat man die richtige Zahlenangabe für den Gesamtwiderstand im ganzen Stromkreis, so ergibt sich die Stromstärke J einfach als Quotient aus Spannung V und Widerstand W

$$J = \frac{V}{W}, \text{ und dies oder auch die Gleichung } J \cdot W = V \qquad 156)$$

ist Ohms Gesetz.

Daß mit steigendem Widerstand W die Stromstärke J sinken muß, bis zu Null beim Öffnen des Stromkreises, was unendlich großen Widerstand bedeutet, ist klar; daß aber dieses Sinken einfach nach verkehrter Proportionalität erfolgt, wie es das Gesetz angibt, und daß der hiefür maßgebende „Widerstand" für jeden Leiter in einfacher Weise für alle Fälle gültig angebbar ist (157), dies ist wieder Geltung einfachster Möglichkeit bei naturmäßig gewähltem Begriff.

Ohms Gesetz gilt nicht nur für Voltas Kette als Stromquelle, sondern ganz allgemein für jede Art von Stromquellen. Ohm selbst hat auch schon viel mit Thermoelementen (224) als Stromquellen gearbeitet, und die allgemeine Gültigkeit ist heute etwas Alltägliches geworden. Dementsprechend ist auch alles, was wir im folgenden über Stromlauf aus Ohms Gesetz schließen (157—170), allgemeingültig.

157. Gesetzmäßigkeiten des Widerstandes. — Der Gesamtwiderstand eines Stromkreises setzt sich zusammen aus den Widerständen seiner einzelnen Leiterstücke, und er ist die Summe dieser einzelnen Widerstände.

Der Widerstand jedes Leiterstückes ist — bei einfacher zylindrischer oder prismatischer Form — bedingt durch Länge, Querschnitt und Stoff desselben. Diese Abhängigkeiten sind nach Ohms Gesetz durch Strommessungen bei festgehaltener Spannung gefunden und festgestellt.

Die Abhängigkeit von Länge und Querschnitt ist die einfachste mögliche: Der Widerstand eines Leiters ist proportional seiner Länge und verkehrt proportional seinem Querschnitt.

Die Abhängigkeit von der Länge ist in alltäglicher Benutzung in den „Regulierwiderständen", die mittels Gleitkontakten die Einschaltung verschiedener Drahtlängen in den Stromkreis gestatten, um nach Belieben verschiedene Stromstärken herzustellen.

Die einfache Abhängigkeit von der Größe des Leiterquerschnitts zeigt, daß die strömende Elektrizität nicht mehr — wie die ruhende — an der Oberfläche des Leiters ihren Sitz hat, sondern daß sie über den ganzen Querschnitt des Leiters gleichmäßig sich verteilt[1]).

Die Form des Querschnittes ist dabei gleichgültig; der runde, vierkantige, plattgewalzte oder in eine Litze verteilte Querschnitt gegebener Größe, Abb. 99, gibt bei gleicher Länge und gleichem Stoff gleichen Widerstand.

Auch hier verhält sich strömende Elektrizität einfacher als strömendes Wasser (vgl. 156). Wohl ist der Reibungswiderstand des Wassers in Röhren deren Länge proportional; die Abhängigkeit vom Röhrenquerschnitt ist aber sehr verwickelt. Der unterteilte Querschnitt 4, Abb. 99, gäbe außerordentlich vergrößerten Widerstand für Flüssigkeit, und selbst bei gleicher Form des Querschnittes gilt kein so einfacher Zusammenhang mit dessen Größe (M 404, 405).

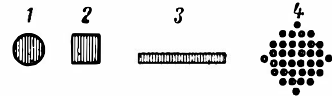


Abb. 99. Leiterquerschnitte gleichen Widerstandes (gleicher Größe).

Die gleichmäßige Verteilung der in gleichbleibendem Strom bewegten Elektrizität über den ganzen Leiterquerschnitt entspricht dem Vorhandensein von Kraftlinien im ganzen Inneren des Leiters bei Strom, gemäß dem von der Quelle unterhaltenen Spannungsgefälle, das den Strom treibt (147) und das wir noch besonders untersuchen werden (161, 162).

Die Abhängigkeit des Widerstandes vom Stoff des Leiters kommt im „spezifischen Widerstand" des Stoffes zum Ausdruck, d. i. im vergleichsweise gemessenen Widerstand bei festgesetzt gleicher Länge und gleichem Querschnitt. Tab. 44 gibt darüber Zahlen[2]), deren Ermittelungsweise alsbald anzugeben ist (160 u. f.). Das Reziproke des spezifischen Widerstandes wird „Leitvermögen" genannt.

Wir hatten spezifische Widerstände verschiedener Stoffe schon früher betrachtet, wobei die Stoffe als Isolatoren dienen sollten (4). Hierbei kamen überhaupt nur Stoffe mit sehr großem spezifischem Widerstand in Betracht; alle Metalle waren für die in jenen Versuchen benutzten hohen Spannungen und kleinen Mengen unterschiedlos gute Leiter. Dies entspricht aber ganz Ohms Gesetz; denn hohe Spannung und kleiner Widerstand geben zusammen nach diesem Gesetz große Stromstärke, d. i. große Mengen in der Zeiteinheit und somit Entladung der vorhandenen kleinen Mengen der alten Quellen

---

[1]) Über das Eindringen der Ladung von der Oberfläche her, beim Ingangsetzen des Stromes, s. 385 u. Anh. E V b, 9, Bd. IV.

[2]) In Tab. 44 ist der spezifische Widerstand des Quecksilbers zur Einheit genommen (vgl. 159). Sonst nimmt man auch den Widerstand von 1 cm Länge bei 1 cm^2 Querschnitt des Leiters als spezifischen Widerstand, der dann kurz als „Widerstand von 1 cm^3" bezeichnet werden kann.

in so kurzen Zeiten, daß Unterschiede verschwinden mußten. Bei den kleinen Spannungen und großen Mengen von Voltas Elementen als Stromquellen treten dagegen die Unterschiede zwischen den verschieden guten Leitern deutlich hervor; daher die fast ausschließliche Benutzung von Kupfer, mit seinem fast kleinsten spezifischen Widerstand als Leiter für starke Ströme.

Tab. 44.

Stoff	Elektrisches Leitvermögen	Spezifischer Widerstand
Silber	59	0·017
Kupfer	55	0·018
Gold	41	0·024
Zink	15	0·067
Eisen	10·8	0·093
Platin	6·5	0·15
Neusilber	5·0	0·20
Quecksilber	1	1
Wismut	0·8	1·2
Graphit	0·02	50
H_2SO_4, 30 v. H.	0·00007	14000
$ZnSO_4$, 25 v. H.	0·000005	200000
Reines Wasser	10^{-10}	10^{10}
Holz, Leinen	Billiontel	Billionen
Gläser, Seide, Schellack, Gase	fast 0	ungeheuer groß

158. Innerer und äußerer Widerstand. — Zur Berechnung der Stromstärke in gegebenem Leiterkreise nach Ohms Gesetz muß der Gesamtwiderstand des Kreises eingesetzt werden. Dieser umfaßt auch den Widerstand in der Stromquelle selbst, den man manchmal „inneren" Widerstand nennt im Gegensatz zum übrigen, „äußeren" Widerstand des ganzen Kreises. Der innere Widerstand ist allerdings besonderer Beachtung wert, weil er unvermeidlich ist, während der äußere Widerstand je nach Umständen veränderlich ist. Oft ist der innere Widerstand auch ein beträchtlicher Teil des Gesamtwiderstandes, so in Voltas Kette, weil die Flüssigkeiten der Elemente hohe spezifische Widerstände haben (vgl. die Beispiele der Säure und Salzlösung in Tab. 44). Es kommt daher für starke Ströme besonders auf kleine Längen und große Querschnitte in den Flüssigkeiten der Elemente an, d. i. auf kleine Abstände und große Flächen der Platten. Die später zu betrachtenden Elemente mit Tonzellen haben wegen des kleinen Gesamtquerschnittes in deren Poren immer ziemlich großen inneren Widerstand.

Elemente in kleiner Ausführung haben immer größeren Widerstand als solche großen Maßstabes bei gleicher Art, wegen der kleinen Flüssigkeitsquerschnitte der ersteren, während die elektromotorische Kraft unabhängig von der Größe, allein durch die Wahl der Stoffe im Element gegeben ist (131).

Will man mit kleinen Elementen möglichst starke Ströme erreichen, so schaltet man sie „parallel" oder „nebeneinander", d. h. man vereinigt alle positiven Platten einerseits und alle negativen andererseits, so daß der Strom in den Elementen sich verzweigt; es kommt dies einer entsprechenden Vervielfachung des Flüssigkeitsquerschnittes gleich. Bei großem äußeren Widerstand nützt dies indessen nicht viel, weil der innere Widerstand dann als Summand wenig ausmacht; es ist dann viel besser die Elemente „hintereinander" zu schalten, wie gewöhnlich (Abb. 97), um durch die entsprechende Vervielfältigung der elektromotorischen Kraft Stromstärke zu gewinnen.

159. Widerstandseinheit. — Um nach Ohms Gesetz Stromstärken in Weber (151) zu berechnen, bedarf man einer passenden Einheit für die Widerstände. Diese Einheit ist das „Ohm" (G. S. Ohm zu Ehren so benannt), nämlich der Widerstand, mit welchem 1 Volt elektromotorische Kraft 1 Weber Stromstärke gibt. Es ist demnach

$$\text{Weber} = \frac{\text{Volt}}{\text{Ohm}} \qquad 159)$$

im Sinne von Ohms Gesetz, und man erhält also Stromstärken bei ihrer Berechnung nach diesem Gesetz sofort richtig in Weber, wenn man die Kräfte in Vol- und die Widerstände in Ohm einsetzt. Das Ohm wird zur Abkürzung manchmal Ω geschrieben. Es gehört, wie Volt und Weber, zum absoluten elektromagnetischen Einheitssystem, nach dessen Behandlung (264 u. f.) wir auf den Ursprung aller dieser Einheiten eingehen werden (289, 353, 354).

Das Ohm ist — wie das Farad (oder Mikrofarad) — eine gut aufbewahrbare Einheit im Gegensatz zum Weber oder auch zum Volt oder Coulomb; man kann es, einmal hergestellt, in Drahtspulen festhalten. Man kann auch, zu stets erneuter Wiederherstellung, Länge und Querschnitt eines Leiters angeben, der 1 Ohm Widerstand hat. Hierzu ist Quecksilber als Leiter gewählt, weil es nicht nur leicht in zuverlässiger Reinheit zu haben ist, sondern auch als Flüssigkeit keinen Verschiedenheiten molekularer Beschaffenheit (Kristallbau, Härte und dgl.) unterworfen ist. In dieser Weise ist das Ohm festgehalten als der Widerstand eines Quecksilberfadens von 1·063 m Länge und 1 mm² Querschnitt bei 0°C Temperatur (vgl. 354). Will man diese Festhaltung benutzen, so füllt man ein Glasrohr mit eingehend untersuchtem Querschnitt und von scharf abschneidender, gemessener Länge mit reinem Quecksilber und berechnet nach Querschnitt und Länge (157) die Ohmzahl des Widerstandes, den man dann zwischen den Enden des (in schmelzendes Eis zu legenden) Rohres hat, die in breite, so gut wie widerstandslose Quecksilbermassen münden.

Man fertigt nach Maßgabe feiner Widerstandsmessungen (168) Drahtspulen an, die 1, 2, 5, 10 usw. Ohm Widerstand haben und vereinigt dieselben in „Widerstandskästen" zu beliebiger Ein- oder Ausschaltung mittels Stöpselkontakten, so daß man beispielsweise alle Widerstände von 0·1 bis 1000 Ohm in Stufen von je 0·1 Ohm zur Verfügung haben kann, wie ein Gewichtssatz alle Gewichte von 0·1 bis 1000 gr mit möglichst geringer Zahl von Einzelgewichtsstücken bietet.

Will man Widerstände gegebener Leiter, z. B. von Drähten, berechnen, so mißt man Länge und Querschnitt und berechnet zunächst den Widerstand eines Quecksilberleiters dieser Abmessungen mit Benutzung der soeben gemachten Angabe für das Ohm; alsdann vervielfacht man mit dem spezifischen Widerstand des betreffenden Stoffes, der dazu in Tab. 44 schon zweckmäßig für Quecksilber als Einheit gegeben ist.

160. Widerstandsmessung in einfachem Stromkreis. — Ersetzt man in einem Stromkreis mit gleichbleibender Stromquelle ein Leiterstück durch ein anderes, und erhält man dabei wieder den gleichen Strom, was ein im Kreise befindliches Galvanometer anzeigen kann, so sind nach Ohms Gesetz die Widerstände der beiden Leiterstücke einander gleich. Es ist klar, daß man in dieser Weise Widerstände durch einfache Vertauschung mit einem Widerstandskasten

(159), den man auf gleiche Stromstärke stöpselt, messen kann. Andere Widerstandsmeßweisen folgen später (166, 168).

161. Spannungsverteilung am Stromleiter. — Wir hatten die Spannungen in Voltas Kette betrachtet (147, Abb. 97); es bleibt jetzt die Frage nach den Spannungen an dem Leiter, welcher die Kette oder eine sonstige Stromquelle schließt, ja überhaupt an Leitern, in welchen Strom fließt.

Es sei der Leiterkreis KacbK (Abb. 100) der Kette K mit 3 Volt Spannung bei b noch offen; der Punkt a habe Erdableitung. Dann haben alle Drähte vom negativen (Zink-) Ende der Kette K über a, c bis b die gleiche Spannung Null gegen Erde, so daß das mit c verbundene Elektroskop oder Elektrometer[1]) V keinen Ausschlag gibt; ebenso hat die Leitung Kb vom positiven (Kupfer-) Ende der Kette überall die gleiche Spannung, nämlich 3 Volt, alles weil die Elektrizitäten an den Leitern ruhen (28). Es stehen sich also an der noch offenen Stelle bei b die beiden Leiterenden mit 3 Volt Spannung gegenüber. Schließt man jetzt bei b den Leiterkreis, so erfolgt schnell ein Ausgleich der Spannung der nun verbundenen Leiterenden b; zugleich beginnt Strom zu fließen. Es ist dies ein Vorgang der Umgruppierung der in Bewegung geratenen Kraftlinien an den Leitern. Bei offenem Kreis ruhten die überall vom 3-Volt-Teil zum 0-Volt-Teil der Leitung laufenden, an den Leitern senkrecht stehenden und an der kurzen offenen Strecke bei b dichtest gehäuften Kraftlinien. Im Augenblick des Schließens sinken alle bei b gehäuften, an Zahl der Kapazität der Leiterenden entsprechenden Kraftlinien im Schließungsfunken zusammen, der die Energie der Kraftlinien empfängt und weitergibt. b ist danach kein Ort gehäufter Kraftlinien mehr; die Spannung von 3 Volt hat sich über die ganze Strecke a b verteilt, wie es die Zahlen in der Abbildung angeben, wobei der Einfachheit halber die durch verschiedene Dicke der Leiter angedeuteten Widerstandsverhältnisse vorausgesetzt sind. Die hierzu führende Umgruppierung der Kraftlinien erfolgt unter Bewegungen derselben, die senkrecht zu ihrer eigenen Richtung mit Lichtgeschwindigkeit vor sich gehen, was wir bereits bemerkten (125) und später weiter betrachten werden (412).

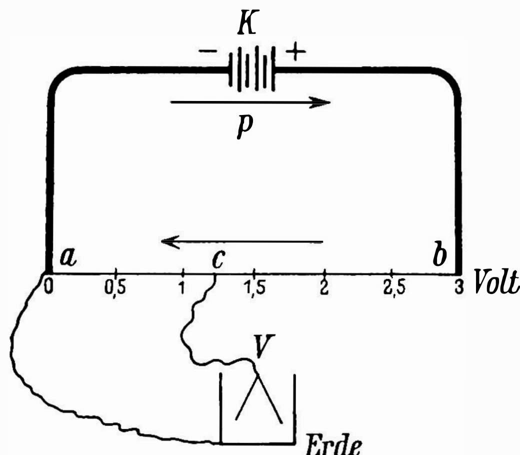


Abb. 100. Spannungsabfall am Stromleiter.

Die neue, in der Abbildung gezeichnete, dauernd fließendem Strom entsprechende Spannungsverteilung kann leicht mit dem Elektrometer V nachgewiesen werden, indem man seinen Zuleitungsdraht bei c gleitend am Drahte

[1]) Man kann ein Aluminiumblatt-Elektroskop benutzen, wenn statt 3 Volt in K 300 Volt (etwa 150 Akkumulatoren) genommen werden.

a b entlang bewegt, wobei V immer die beim jeweiligen Berührungspunkt c herrschende Spannung gegen Erde anzeigen wird, da die Elektrizität von c bis V ruht und also V dieselbe Spannung haben muß wie c. Man findet so am Drahte a c der Reihe nach die dort verzeichneten Spannungen: ein Spannungsgefälle (95) hat sich längs des Stromleiters ausgebildet, und dies gilt für jeden Leiter, der Strom hat.

Daß in unserem Versuche das Gefälle auf die Strecke a b konzentriert ist und an den Leitern a K und K b, die denselben Strom tragen, so gut wie fehlt, dies hat seinen Grund in dem angenommenen sehr kleinen Widerstand dieser dicken Kupfer-Zuleitungen von der Kette nach den Enden des dünnen Drahtes a b, was alsbald allgemein klar wird (164). Für jetzt ist dies unwesentlich, da wir nur den Draht a b näher untersuchen und da ebensogut eine höhere Spannung in K sein könnte, um die 3 Volt an a b zu ergeben.

Wesentlich ist, daß die Spannung der Stromquelle, samt allen Abstufungen kleinerer Spannungen bis zu Null, am Stromleiter verteilt vorhanden ist und daß dieser Zustand, der nicht der Ruhe entspricht (28), von der Stromquelle K dauernd unterhalten wird.

162. Elektrische Kraftlinien bei Strom. — Während der Leiter Strom und das zugehörige Spannungsgefälle hat, bewegen sich immer neue Kraftlinien aus der Stromquelle heraus und gleiten mit ihren Enden immer den Drähten entlang zunächst zu den Punkten a und b (Abb. 100), von wo aus die Enden zusammengehen, bis jede der Kraftlinien im Drahte a b verschwindet, ganz wie wir dies schon bei der Entladung eines Kondensators betrachteten (125).

In der Tat verhält sich die Stromquelle ganz wie eine immerfort von selbst sich geladen haltende Kleistsche Flasche[1]. Sie tut das vermöge ihres Vorrates von chemischer Energie (206 u. f.), und diese Energie geht in der beschriebenen Weise in Kraftlinienform in den Draht a b, wo sie als eine der Stromwirkungen — in diesem Fall Wärme — erscheint.

Bei ihrem Hinein-Gleiten und -Sinken in den Draht a b stehen die Kraftlinien mit ihren Enden schief zum Draht; man könnte sagen: sie fallen hinein (s. 330). Sie haben dabei tangentiale Komponenten, wie in Abb. 77 (52 u. f.), wo wir schon Elektrizitätsbewegung an Leitern unter dem Einfluß schiefstehender Kräfte betrachteten. Die Größe der tangentialen Kraftkomponente ist gleich dem Spannungsgefälle längs des Leiters an seiner betreffenden Stelle. Es geht dies aus der früheren Überlegung über Spannungsgefälle hervor (94, 95), wobei wir, bei ruhender Elektrizität, Spannungsgefälle im Raume zwischen verschiedenen Leitern fanden; jetzt, bei bewegter Elektrizität, liegt das gleiche zwischen Punkten eines und desselben Leiters vor, weil diese durch Kraftlinien verbunden sind. Unter dem Einfluß von deren tangentialer Kraftkomponente geht die Bewegung der Elektrizität im Leiter vor sich[2].

Die Geschwindigkeit dieser Bewegung und damit die Stromstärke könnte im einfachsten Fall proportional der treibenden Kraftkomponente, also dem Spannungsgefälle am Leiter sein. Daß dies der Wirklichkeit entspricht, dies zeigt sich durch die Gültigkeit von Ohms Gesetz (156) und ist

[1] Dies hat schon Volta für seine Säule hervorgehoben.

[2] Die gesonderte Betrachtung der Bewegungen der normalen Komponenten der Kraftlinien findet man im Anhang E V a 9 und E V b 9, Bd. IV.

der besondere Inhalt desselben[1]). Das Folgende zeigt die Proportionalität von Strom und Spannung auch für jedes einzelne Leiterstück.

163. Ohms Gesetz auch für jeden Teil des Leiterkreises gültig. — Das Vorhandensein des Spannungsgefälles an jedem stromführenden Leiter (161) und die dem Gefälle proportionale Stromstärke in ihm bedeutet die Gültigkeit von Ohms Gesetz nicht nur für den ganzen Stromkreis, sondern auch für jeden Teil desselben einzeln. Der Proportionalitätsfaktor zwischen Spannung und Strom muß auch für den Leiterteil derselbe sein, wie für den ganzen Kreis, nämlich der Widerstand des betreffenden Teiles, da der Widerstand des ganzen Kreises aus den Widerständen der Teile zusammengesetzt ist (157). Sind w die Widerstände der einzelnen Teile, v die Spannungen zwischen ihren Enden, so sagt die Anwendung von Ohms Gesetz (Gl. 156) auf jeden Teil beim Strom J, daß $Jw = v$ sei. Die Summierung über alle Teile des ganzen Kreises gibt danach $\Sigma Jw = \Sigma v$, oder, da J gemeinsam ist (152), $J\Sigma w = \Sigma v$. Σw ist aber der ganze Widerstand W des Kreises und Σv die ganze Spannung oder die elektromotorische Kraft V der Kette, womit $JW = V$ wird, was Ohms Gesetz für den ganzen Kreis ist, mit welchen somit das auf die Teile angewandte Gesetz in Übereinstimmung ist.

Die Gültigkeit seines Gesetzes für jeden beliebigen Teil eines Stromkreises hat schon Ohm durch besondere Versuche nachgewiesen, wenn auch nicht in so einfacher Form ausgesprochen.

164. Die Erkenntnis, daß für jedes beliebige Leiterstück ebenso wie für den ganzen Stromkreis Ohms Gesetz gilt, daß nämlich stets $J = V/W$ oder $JW = V$ ist, ist von großer Wichtigkeit für *viele Anwendungen* (164—169). Es ist nur festzuhalten, daß bei der Anwendung auf den ganzen Kreis W dessen Gesamtwiderstand, V die gesamte elektromotorische Kraft ist, bei der Anwendung auf ein Stück aber W dessen Widerstand und V die Spannung an dessen Enden ist.

Man übersieht vor allem leicht die *Spannungsverteilung in jedem gegebenen Stromkreise.* Alle Teile des Kreises, die kleinen Widerstand W haben, werden auch entsprechend kleinen Spannungsabfall V haben müssen. So übertragen im Beispiel der Abb. 100 die dicken Kupferzuleitungen K a und K b — wie schon bemerkt — fast die ganze Spannung der Kette an die Enden des Hauptwiderstandes a b.

Hat die *Stromquelle* selbst großen inneren Widerstand (158), so ist *auch in ihr entsprechender Spannungsabfall,* und man hat schon an den Klemmschrauben der Kette verringerte Spannung, sobald der Strom geschlossen wird, obgleich an den elektromotorisch wirksamen Flächen (143) in jedem Element die volle, den Stoffen zugehörige Spannung bestehen bleibt.

Daß Leiter von geringem Widerstand nur entsprechend geringe Spannung an ihren Enden aufrechterhalten, dies ist analog der guten Ausgleichung von Temperaturunterschieden in guten Wärmeleitern oder — Spannung wieder mit Druck vergleichend (29) — dem Fehlen großer Druckunterschiede beim Strömen von Wasser in weiten Röhren.

Bei *Fortleitung von Strom auf große Entfernungen* kommt das Spannungsgefälle an den Leitungen als unerwünschter *Spannungsverlust* in Betracht; so z. B. in Städten bei den zur Beleuchtung dienenden Strömen. Die Beleuchtungskörper sind für eine bestimmte Spannung eingerichtet, welche demnach an allen Abnahmestellen, nahe und ferne von

[1]) Wir werden später zeigen, daß die Proportionalität auch mit der Kenntnis der Vorgänge der Elektrizitätsbewegung in den Leitern in Übereinstimmung ist, wo solche Kenntnis vorhanden ist, nämlich für die leitenden Flüssigkeiten und Gase. Ohms Gesetz hat dort die Bedeutung der Proportionalität der Wanderungsgeschwindigkeit der Jonen und Elektrizitätsträger mit der sie treibenden Kraft (vgl. 196, 503 u. f.).

der Stromquelle, möglichst gleichmäßig vorhanden sein muß. Dazu dürfen auch die längsten Leitungen keinen beträchtlichen Spannungsunterschied V an ihren Enden haben, d. h. $JW = V$ muß für dieselben klein sein. Man sieht, daß dies bei Übertragung starker Ströme J entsprechend kleinen Widerstand W, also dickes Kupfer erfordert, wobei die erforderlichen Kupfermengen außerdem mit der Länge der Leitung wachsen. Dies begrenzt die Möglichkeit, beliebig starke Ströme auf große Entfernungen, z. B. von Stadt zu Stadt, ohne große Spannungsverluste fortzuleiten. Da es in letzter Linie immer auf Energieübertragung ankommt, ist der Ausweg vorhanden, schwache Ströme, aber mit entsprechend hoher Spannung, für die Fernleitung zu benutzen, was ebenfalls große Energiemengen überträgt (119). Wir kommen hierauf bei Behandlung der zur elektrischen Energieübertragung dienlichen Mittel zurück (376, 394).

165. Dynamische Spannungsmessung. — Schaltet man eine Stromquelle an ein Galvanometer (155), so zeigt dies einen Strom an, der nach Ohms Gesetz gegeben ist durch die elektromotorische Kraft der Stromquelle und durch den Gesamtwiderstand. Letzterer besteht aus dem Widerstand des Galvanometers und dem der Stromquelle. Es sei nun der Widerstand des Galvanometers sehr groß, so daß der Widerstand der Stromquelle daneben als unmerklich kleiner Summand verschwindet. Schaltet man dann der Reihe nach verschiedene Stromquellen mit durchweg kleinem inneren Widerstand an das Galvanometer, so wird man Zeigerablenkungen erhalten, die jedesmal als Maß der elektromotorischen Kraft der Stromquelle dienen können; denn der nach Ohms Gesetz für die Stromstärke und also die Zeigerablenkung mitbestimmende Widerstand ist merklich immer derselbe, nämlich der große Widerstand des Galvanometers. Man kann dann das Galvanometer auch in Volt graduieren, statt in Weber, zu unmittelbarer Spannungsablesung.

In dieser Weise kann jeder Strommesser mit großem Eigenwiderstand als Spannungsmesser dienen. Die gewöhnlichsten Spannungsmesser — „Voltmeter" — aller Schalttafeln sind von dieser Art. Man mißt hierbei Spannung durch den Strom, welchen sie hervorbringt — „dynamisch" —, und dies wird immer richtig sein, wenn nur die zu messende Stromquelle keinen zu großen eigenen Widerstand hat. Ist hinter der zu messenden Spannung keine genügende Menge verfügbar, wie etwa bei einem isolierten, geladenen Leiter, so ist die dynamische Meßweise selbstverständlich unbrauchbar. Man mißt mit derselben die Spannungen so, wie man Wasserdrucke durch die Ausflußmengen aus kleiner Öffnung messen würde; auch hier muß Mengenvorrat da sein und es darf die Ausflußmenge stets nur klein sein, sonst fälscht (erniedrigt) sie merklich den zu messenden Druck.

In jedem Falle zeigt der dynamische Spannungsmesser richtig die an seinen Drahtenden tatsächlich vorhandene Spannung an: seine „Klemmenspannung", Denn diese Spannung bestimmt (zusammen mit dem unveränderlichen Widerstand des Spannungsmessers) nach Ohms Gesetz — angewandt auf die Leitung zwischen den Klemmen — den im Spannungsmesser fließenden Strom und damit die Zeigerablesung.

Wegen des großen Widerstandes werden die Ströme in diesen Voltmessern immer nur schwach sein; man kann aber Galvanometer so empfindlich machen (319), daß doch sehr gut Tausendtel Volt und weniger gemessen werden können.

Für sehr hohe Spannungen, 1000 Volt und mehr, ist die Isolation im Galvanometer zu schwierig; hier kommen die statischen Spannungsmesser zur Anwendung, besonders das absolute Elektrometer (100) oder die nach ihm geeichten Elektroskope und Funkenstrecken (34, 35).

166. Widerstandsmessung mit Strom- und Spannungsmesser. — Dies ist eine sehr einfache Anwendung von Ohms Gesetz auf den zu messenden Widerstand eines Leiterstücks. Man bildet aus diesem Widerstand, a b (Abb. 101), einem Webermesser und einer Stromquelle, K, einen Stromkreis und schaltet an die Enden a b des Widerstandes einen Voltmesser, wie es die Abbildung zeigt. Ist der Strom beispielsweise 1 Weber und die Spannung 2 Volt, so ist der Widerstand a b 2 Ohm, weil nach Ohms Gesetz, $JW = V$, $V/J = W$, also im Beispielsfall 2 Volt/1 Weber = 2 Ohm ist (159).

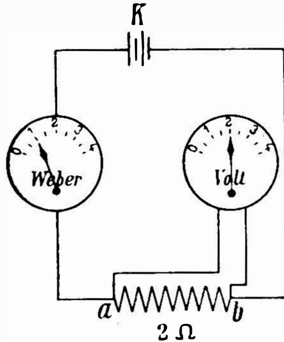


Abb. 101. Ohms Gesetz in Anwendung auf ein Leiterstück. Widerstandsmessung mit Strom und Spannungsmesser.

Der große Widerstand des Voltmessers (165) verhindert es dabei, daß im zu messenden Widerstand ein merklich anderer Strom fließt als im Webermesser (vgl. 167), so daß die Rechnung zutrifft.

167. Einfache Stromverzweigung. — Ein Stromleiter A a (Abb. 102), von der Stromquelle kommend, verzweige sich bei a, so daß der Strom sowohl auf dem Zweige 1 als auch auf 2 nach b gelangen kann, wo die beiden Zweige sich wieder vereinigen zum weiteren Wege über B zurück zur Stromquelle. Der ungeteilte Strom sei J, seine beiden Teile über 1 und 2 seien i_1 und i_2, und die beiden Widerstände zwischen a und b seien w_1 und w_2. Es werden i_1 und i_2 bei gegebenem J gesucht.

Zunächst ist sicher, daß $i_1 + i_2 = J$ sein muß, weil bei dauernd gleichmäßigem Fließen des Stromes weder bei a noch bei b Elektrizitätsanhäufung eintreten kann, welche Spannungsänderungen und somit Stromänderungen ergäbe. Außerdem gilt für jeden der beiden Zweige Ohms Gesetz und sie haben beide dieselbe Spannung V an ihren gemeinsamen Enden a b; es ist daher $V = i_1 w_1 = i_2 w_2$ und somit $i_1 : i_2 = w_2 : w_1$.

Das Teilungsverhältnis des Stromes zwischen den zwei Zweigen ist also gegeben durch das umgekehrte Verhältnis der beiden Widerstände. Hieraus kann man mit der vorangestellten Summengleichung leicht i_1 und i_2 einzeln berechnen.

Fragt man nach dem Widerstand, welchen die beiden Zweige zusammen von a bis b dem Strom J bieten, d. i. nach dem Widerstand eines einfachen Leiters, welcher an Stelle der beiden Zweige denselben Strom J bei der Spannung V zwischen a und b gäbe, so muß dieser Widerstand W nach Ohms Gesetz der Gleichung genügen $J = V/W$, und dies gibt mit den vorherigen Gleichungen $1/W = 1/w_1 + 1/w_2$. Es addieren sich also die reziproken Widerstände — die Leitfähigkeiten — der „nebeneinander" oder „parallel" geschalteten Zweige, während bei der gewöhnlichen „Hintereinanderschaltung", wie im einfachen Stromkreis, die Widerstände sich addieren (157), und dies gilt auch bei beliebig vielen Leitern oder Zweigen.

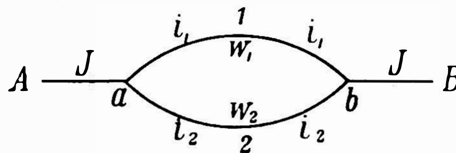


Abb. 102. Stromverzweigung.

Die Stromverzweigung wird häufig beim Messen starker Ströme benutzt. Man baut nicht Galvanometer für 10 oder 100 Weber, weil so starke Ströme die isolierten Drähte zu sehr erhitzen würden; man kann aber leicht ein genau bemessenes Zehntel oder Hundertel des zu messenden Stroms durch das Galvanometer gehen lassen und den Rest außen vorbei, wenn man dem Galvanometer einen „Nebenschluß" gibt, d. h. es parallel mit einem passend gewählten, für starke Ströme tauglichen Widerstand schaltet. Hat z. B. ein Strommesser, dessen Skale von 0·01 bis 1 Weber geht, 99 Ohm Widerstand, und ist ein Nebenschluß von 1 Ohm Widerstand vorgesehen, so kann man ohne den Nebenschluß bis 1 Weber, mit dem Nebenschluß aber weiter von 1 bis 100 Weber messen.

Auch zur Eichung sehr empfindlicher Galvanometer, d. i. zur Vergleichung derselben mit anderweitig schon geeichten Meßinstrumenten für stärkere Ströme, setzt man erstere in Nebenschluß, während letztere den ungeteilten Strom haben.

168. Widerstandsmeßbrücke. — Zu genauester Messung von Widerständen benutzt man

eine Stromverzweigung, Abb. 103, die von der vorherbetrachteten, einfachen Verzweigung nur durch die Hinzufügung einer leitenden „Brücke" c d zwischen den beiden Zweigen unterschieden ist. Es kommt dabei auf die Frage an: unter welchen Umständen kein Strom in der Brückenleitung c d fließen wird.

Daß die Brücke sehr wohl stromlos sein kann, obgleich Strom von a nach b fließt, dies ist schon daraus klar, daß der Strom ebensogut den Weg a c d b als a d c b nehmen, also in der Brücke ebenso gut hin als her fließen könnte. Weiter ist klar, daß es sogar unendlich viele Punktpaare an den beiden Zweigen zwischen a und b geben muß, die man durch eine Brücke verbinden könnte, ohne Strom in der Verbindung zu erhalten; denn man hätte nur irgend zwei Punkte gleicher Spannung miteinander zu verbinden, und solcher Punktpaare müssen sich unendlich viele finden, weil beide Zweige den gleichen, mit der gemeinsamen Spannung an a anfangenden, an b endenden Spannungsabfall haben.

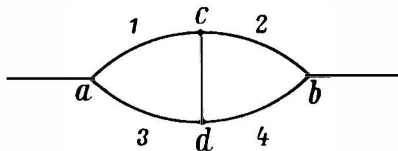


Abb. 103. Widerstands-Meßbrücke.

Um die Bedingung zu finden, welcher die Widerstände der vorhandenen Leiter für Stromlosigkeit der Brücke genügen müssen, wendet man Ohms Gesetz auf die mit 1 bis 4 bezeichneten Leiterteile an, deren Widerstände w, Ströme i und zwischen den Enden bestehende Spannungen v der Reihe nach durch die Zahlen 1 bis 4 gekennzeichnet seien. Es muß, wenn c und d gleiche Spannung haben sollen, $v_1 = v_3$ und $v_2 = v_4$ sein, also nach Ohms Gesetz $i_1 w_1 = i_3 w_3$ und $i_2 w_2 = i_4 w_4$, und außerdem wegen der Stromlosigkeit der Brücke $i_1 = i_2$ und $i_3 = i_4$, was zusammen für diese Stromlosigkeit noch die Bedingung gibt $w_1 : w_2 = w_3 : w_4$.

Dies ist die „Brückengleichung" zur Widerstandsmessung (Wheatstone 1843). In der Ausführung ist w_1 der zu messende Widerstand, w_2 ein diesem möglichst gleich[1]) gestöpselter Widerstandskasten (159), und w_3 und w_4 bilden zusammen einen an einer Längenteilung ausgespannten Draht, an welchem die Gleitstelle d des Brückendrahtendes solange verschoben wird, bis die Brücke stromlos ist, was man an einem in ihr befindlichen Galvanometer erkennt. $w_3 : w_4$ ist dann als Verhältnis der beiden abzulesenden Drahtlängen bekannt und w_2 am Widerstandskasten ersichtlich, wodurch w_1 aus der Brückengleichung berechenbar wird.

Diese Widerstandsmessung ist mit einem feinen Galvanometer so empfindlich, daß man leicht kleinste Änderungen eines Widerstandes erkennt, so beispielsweise bei Temperaturänderung.

169. Temperaturabhängigkeit der Widerstände. — Messungen mit der Brücke haben ergeben, daß alle reinen Metalle ihren Widerstand mit steigender Temperatur steigern. Bei tiefsten Temperaturen werden die Widerstände der Metalle äußerst klein (511, W 245). Legierungen können — wie in allen ihren Eigenschaften — völlig anderes Verhalten zeigen als ihre Bestandteile. Besonders wertvoll sind für die Drähte der Widerstandskästen (159) Legierungen, deren spezifischer Widerstand wenigstens innerhalb der Veränderungen der Zimmertemperatur unverändert bleibt; Nickel- und Mangan-haltige Kupferlegierungen („Nickelin", „Manganin", „Konstantan") entsprechen dem.

Elektrolyte, flüssige Leiter, verhalten sich entgegengesetzt den Metallen; ihr Widerstand sinkt bei steigender Temperatur (200).

Die große Empfindlichkeit der Brückenmethode macht sie mittels der Temperaturabhängigkeit der Widerstände sogar zur Temperaturmessung geeignet. Es kommt dazu der in Messung befindliche Widerstand eines temperaturempfindlichen, reinen Metalles, wie z. B. Platin, mit Kupferzuleitungen an die Stelle, wo die Temperatur gemessen werden soll, und es entspricht dann bei Unveränderlichkeit der Widerstände der anderen Brückenzweige jeder Stellung des Galvanometerzeigers in der Brücke eine bestimmte Temperatur, die durch Eichung nach sonstiger Temperaturmessung ermittelt sein kann. Dieses „Widerstandsthermometer" ist besonders dadurch wertvoll, daß es Fernanzeigen geben kann und bis zu sehr hohen Temperaturen eichbar ist (W 45).

Ist der in Messung befindliche Widerstand ein dünnes, geschwärztes Blech aus geeignetem Metall (z. B. Platin), und empfängt es Strahlung (z. B. Ultrarot), die von der Schwärzung absorbiert wird und also Erwärmung des Bleches ergibt, so kann das Widerstandsthermometer

[1]) Diese Gleichheit gibt die größte Genauigkeit der Messung.

zu sehr empfindlicher Strahlungsmessung benutzt werden, in welcher Anwendung es „Bolometer" genannt wird.

170. Beliebig verzweigte Stromleitungen; Stromverteilung in flächenhaften und körperlichen Leitern. — Es genügen für alle diese Fälle die am einfachen Stromkreise und an der einfachen Verzweigung schon entwickelten Gedanken (163, 167). Hat man ein Leiternetz mit beliebig vielen Verzweigungsstellen und beliebig in ihm verteilten Stromquellen, so gilt für jede Verzweigungsstelle $\Sigma i = 0$, wobei alle zur Verzweigungsstelle hin gerichteten i positiv, alle weggerichteten negativ zu rechnen sind, und es gilt für jeden geschlossenen Stromkreis, der in dem Netz zu finden ist, $\Sigma iw = \Sigma v$, wobei in einerlei Kreissinn gerichtete Ströme i und elektromotorische Kräfte v positiv, die anderen negativ zu rechnen sind. Dies gibt stets genug Gleichungen zur Berechnung aller i, wenn alle w und v gegeben sind (Kirchhoff 1848).

Die Anwendung der gleichen Gedanken auf die Raumelemente von flächenhaften oder körperlichen Leitern ergeben auch die Stromverteilung in diesen.

c) Chemische Wirkungen elektrischer Ströme.

171. Erste Beobachtungen. — Diese Wirkungen wurden entdeckt, sobald man versuchte, den Strom von Voltas Säule durch flüssige Leiter gehen zu lassen, indem man die Enddrähte der Säule oder an denselben befestigte Platten in die Flüssigkeit tauchte. Schon gewöhnliches, unreines Wasser genügte als so eingeschalteter flüssiger Leiter, um sehen zu lassen, daß in ihm Veränderungen vor sich gehen; die Flüssigkeit braust auf, was Einige zuerst für Wärmeentwicklung hielten. Nähere Untersuchung zeigte, daß es nicht Kochen der Flüssigkeit ist, sondern etwas ganz Neues; nicht Wasserdampf entweicht aus ihr, sondern die Bestandteile des Wassers sind es, Wasserstoff und Sauerstoff, die entweichen: das Wasser wird chemisch zerlegt! Große Aussichten eröffnete so schon frühe der Gebrauch von Voltas Säule, und alsbald wurden solche chemische Wirkungen auch bei vielen anderen flüssigen Leitern beobachtet.

172. Benennungen. — Faraday, der, wie vorher schon Davy und Berzelius, eingehend die chemischen Stromwirkungen untersuchte, hat die heute gebräuchlichen, dazugehörigen Benennungen eingeführt. Den Vorgang nennt er Elektrolyse, den zerlegbaren Leiter Elektrolyt. Elektrolyte sind genau jene Leiter, die Volta „II. Klasse" nannte (139). Ein Leiter I. Klasse, der in die Spannungsreihe gehört (136), ist nie Elektrolyt. Gute Elektrolyten sind immer chemisch zersetzbare Flüssigkeiten, die überhaupt als einigermaßen gute Stromleiter in Betracht kommen; diese erfahren alle Elektrolyse. Salzlösungen, verdünnte Säuren und Basen, vor allem somit wässrige Flüssigkeiten sind die besten Elektrolyte; aber auch geschmolzene Salze gehören dazu. Auch zähe feste Körper (z. B. Glas bei hoher Temperatur), deren Teile Diffusion gestatten (vgl. M 273, 316) können Elektrolyte sein.

Die Strom-zuführenden und -abführenden Drähte oder Platten nennt Faraday Elektroden und zwar die zuführende, somit die mit dem positiven Ende der Stromquelle verbundene Elektrode Anode, die abführende, negative Elektrode Kathode.

173. Einfachste Elektrolysen. — Für alle Elektrolysen gilt es, daß die Produkte der Zersetzung nur an den Elektroden auftreten, niemals mitten in der Flüssigkeit. In der Strombahn selbst, die in der Flüssigkeit eine beliebige Länge haben kann, wird unmittelbar überhaupt nichts merklich.

Bei der Wasserzersetzung erscheint der Wasserstoff an der Kathode, der Sauerstoff an der Anode und zwar entsprechend der Zusammensetzung des Wassers ersterer im doppelten Volum des letzteren, wie es in Abb. 106b (189) zu sehen ist. Der Strom läuft hier (wie in allen unseren Abbildungen über Elektrolyse) von rechts nach links, so daß rechts Anode, links Kathode ist. Fängt man beide Gase gemeinsam auf, wie in Abb. 104 (175), so erhält man das bekannte Knallgas.

Neben der elektrolytischen Wasserzersetzung sind bemerkenswert die Abscheidungen von Metallen aus den Lösungen oder Schmelzflüssen ihrer Salze. Allgemein gilt hierbei die Regel: Wasserstoff und die Metalle scheiden sich an der Kathode aus; Sauerstoff, Säurereste, Haloide, an welche sie gebunden waren, an der Anode.

Stets ergibt sich also eine Zweiteilung der Moleküle des Elektrolyten; der eine Teil geht nach der Kathode, der andere nach der Anode.

174. Abgeschiedene Mengen; Faradays erstes Gesetz der Elektrolyse. — Die durch Elektrolyse in der Zeiteinheit abgeschiedenen Mengen irgendwelcher Stoffe hängen nur von der Stromstärke ab und sind dieser proportional. Dies ist Faradays erstes Gesetz der Elektrolyse. Die Einfachheit dieses Ergebnisses zusammengefaßter Erfahrung ist sehr bemerkenswert. Man kann z. B. Knallgas aus sehr verschiedenen Elektrolyten abscheiden, wie etwa wässriger Schwefelsäure verschiedener Konzentrationen, Essigsäure, Glaubersalzlösung und vielen anderen wässerigen Lösungen: sobald man aber nur überhaupt Knallgas erhält, ist es beim gleichen Strom in gleicher Zeit immer dieselbe Menge; man kann große oder kleine Elektroden verwenden, kurze oder lange Stromwege in der Flüssigkeit nehmen: dies alles ist ohne Einfluß. Ebenso ist es bei Abscheidung sonstiger Stoffe durch Elektrolyse.

Die Proportionalität der abgeschiedenen Mengen mit der Stromstärke ist dabei mittels des Galvanometers (155), d. i. nach der auf Magnetpole ausgeübten Kraft des Stromes kontrolliert. Aber gerade die Übereinstimmung der abgeschiedenen Mengen mit diesem vorerst willkürlichen Strommaß bedeutete sogleich eine wesentliche Sicherung der Annahme, daß mit dem Galvanometer wirklich Elektrizitätsmengen in der Zeiteinheit gemessen werden, was sich in der Folge bestätigte (214) und auch unzweifelhaft nachweisbar wurde (299). Man kann dementsprechend auch sagen: Durch einen Elektrolyten gegangene Elektrizitätsmengen und abgeschiedene Stoffmengen sind einander proportional.

175. Voltameter. — Die Feststellung jenes Gesetzes der abgeschiedenen Mengen hat sogleich die Strommessung mittels chemischer Wirkung begründet. Man nennt die hierzu dienlichen Vorrichtungen — die chemischen Webermesser — „Voltameter". Abb. 104 zeigt ein einfaches Knallgasvoltameter. Die Flüssigkeit ist verdünnte Schwefelsäure, die Elektroden aus Platin stehen in geringem Abstand voneinander am unteren Ende einer in cm³ geteilten Röhre. Man liest die in gemessener Zeit entwickelte Knallgasmenge ab, reduziert auf 760 mm Druck[1]) und 0°C (W 40), wozu das im Meßrohr angebrachte Thermometer dient, und rechnet auf die Zeiteinheit um. Da festgestellt ist, daß

[1]) Wobei auch der Wasserdampfdruck zu berücksichtigen ist (W 214).

1 Weber 10·44 cm^3 Knallgas in 1 Minute abscheidet (293), ist damit sogleich eine *Strommessung in Weber* ausgeführt.

Das Voltameter dient in dieser Weise auch zur gesicherten *Festhaltung der* einmal nach ihrer besonderen Definition hergestellten *Stromeinheit* Weber (151, 293). Alle anderen Strommesser werden mittels Voltameter in Weber geeicht, bzw. nachgeprüft.

Größere Genauigkeit als das Knallgasvoltameter bietet das *Kupfer-* und besonders das *Silbervoltameter*, bei welchen an Stelle von Volummessung die Wägung abgeschiedener Kupfer- bzw. Silbermengen tritt. Elektrolyten in diesen Voltametern sind Kupfersulfat- bzw. Silbernitratlösung; die Kathode, aus Kupfer bzw. Silber bestehend, wird vor und nach Stromdurchgang mit gemessener Zeit gewogen. Besteht die Anode aus dem gleichen Metall, so wird durch den an ihr sich abscheidenden Säurerest ebensoviel von ihr gelöst als an der Kathode sich abscheidet, so daß die Flüssigkeit ungeändert bleibt.

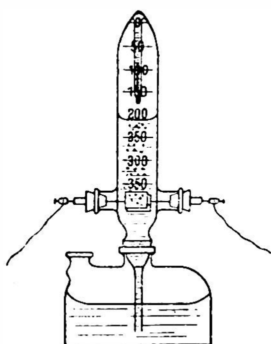


Abb. 104.
Knallgas-Voltameter.

Die Silberabscheidung für 1 Weber beträgt 1·118 mgr/sek und dies ist die *genaueste Festhaltung der Stromeinheit.*

176. *Chemische und technische Anwendungen.* — Die chemischen Stromwirkungen waren sogleich ein mächtiges Forschungsmittel für die Chemie. Bisher unbekannt gebliebene, nur vermutete Elemente wurden entdeckt. So zuerst das Kalium und Natrium; sie erschienen an der Kathode bei Elektrolyse der durch die Stromwärme selbst schmelzenden, vorher ein wenig befeuchteten Ätzalkalien (Davy 1807).

Viele Metalle werden im Großen und zwar ausschließlich elektrolytisch gewonnen, so vor allem das Aluminium. Bei anderen Metallen, wie Kupfer, Quecksilber, Wismut bildet Elektrolyse den besten Weg zu besonders reiner Abscheidung.

Metallische Überzüge können leicht hergestellt werden, wenn man die zu überziehenden Gegenstände in geeignetem elektrolytischem Bade als Kathode benutzt (Vergoldung, Versilberung, Vernickelung); nicht leitende Gegenstände überzieht man dazu vorerst mit gut leitendem Graphit.

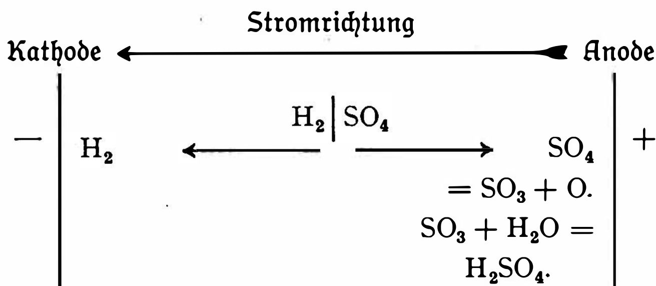
Löst man einen solchen, beliebig dick zu machenden Überzug ab, so erhält man eine genaue Abformung des betreffenden Gegenstandes („Galvanoplastik").

Zu bemerken ist für alle solche Anwendung, daß die Beschaffenheit des abgeschiedenen Metalls — ob pulverig, kompakt, kristallinisch usw. — weitgehend beeinflußbar ist durch Wahl geeigneter Verbindungen als Elektrolyten, durch Zusätze, Temperatur und durch die Stromstärke im Verhältnis zur Flächengröße der Kathode (Stromdichte).

177. *Sekundäre chemische Vorgänge an den Elektroden.* — Reines Wasser ist ein zu schlechter Leiter (vgl. Tab. 44), als daß es merkliche Elektrolyse zeigen könnte. Immer sind es Verunreinigungen, welche genügend gute Stromleitung und damit auch entsprechende Zersetzung des Wassers ergeben; schon die aus Glasgefäßen gelösten Alkalien und die Kohlensäure aus der Luft haben merklichen Einfluß in dieser Richtung, und wenige Tausendteile eines Salzes oder von Schwefelsäure im Wasser ermöglichen schon die lebhafteste Knallgasentwickelung bei Stromanlegung.

Sehr bemerkenswert ist hierbei, daß nicht diese Zusätze zersetzt erscheinen, die doch erst die erforderliche Leitung des Stromes bewirken, sondern das Wasser, das selber gar nicht entsprechend leitet. Die eingehende Untersuchung zeigt, daß hier — wie auch sonst oft bei Elektrolysen — die Stromwirkung begleitet ist von

chemischen Umsetzungen an den Elektroden, die für das Endergebnis mitbestimmend sind. Es ist im Falle der Elektrolyse des Wassers in der Tat der Zusatz, z. B. die Schwefelsäure, der sowohl die Elektrizitätsleitung besorgt, als auch die Zersetzung erfährt; das Wasser kommt nur auf dem Umwege über die Schwefelsäure dazu, das Knallgas zu liefern. Der Vorgang ist folgender:



Das Schwefelsäuremolekül, H_2SO_4, zerfällt, wie es der Trennungsstrich andeutet, in H_2 und SO_4. H_2 wandert, wie es der Pfeil anzeigt, mit dem Strom zur Kathode und häuft sich dort; SO_4 wandert in der entgegengesetzten Richtung und häuft sich an der Anode. Die unbeständige Gruppe SO_4 zerfällt aber in SO_3 und O. Der Sauerstoff O bleibt an der Anode; SO_3, Schwefelsäureanhydrid, nimmt sofort Wasser auf und ergänzt sich wieder zu Schwefelsäure, H_2SO_4. Was sichtbar wird, ist nur das Entweichen des Wasserstoffs an der Kathode und des Sauerstoffs an der Anode und zwar in dem Verhältnis H_2 und O, in welchem sie im Wasser gebunden sind. Es stammen aber diese beiden entweichenden Gase doch nicht aus dem Wasser, sondern, wie gezeigt, aus der Schwefelsäure. Diese wird aber nicht verbraucht, sondern, wie wir sahen, immer wieder zurückgebildet, was allerdings unter Wasserverbrauch stattfindet. Das so verbrauchte Wasser ist es, das verschwindet, während an seiner Stelle die Bestandteile anderen Wassers, das vorher in der Schwefelsäure gebunden war, entweichen.

Da die zurückgebildete Schwefelsäure sofort wieder dem gleichen Zerfall und dem weiteren Vorgang unterliegt, ist ersichtlich, daß sehr kleine Mengen solchen Zusatzes genügen, um beliebig große Mengen von Wasser zur Zersetzung zu bringen.

Vorgänge dieser Art, wobei ein in beschränkter Menge vorhandener Stoff vorübergehende Änderung erleidet, mittels deren immer wieder neue, unbegrenzte Mengen eines anderen Stoffes zu chemischer Umsetzung kommen, sind auch sonst bekannt; man nennt sie „katalytisch“ und den in unverhältnismäßig kleiner Menge so wirkenden Stoff „Katalysator“.

178. Ein Nachweis des geschilderten Vorgangs bei der Elektrolyse verdünnter Schwefelsäure ist ermöglicht durch die Anhäufung der Schwefelsäure an der Anode, die er zur Folge hat (vgl. die schematische Darstellung). Man kann diese Anhäufung, und noch mehr dazu, am einfachsten sichtbar machen, wenn man statt der Schwefelsäure schwefelsaures Natrium, Glaubersalz, Na_2SO_4, dem Wasser zusetzt, das im Sinne von $Na_2|SO_4$ spaltet. Es erfolgt dann an der Anode der schon betrachtete Vorgang, wie bei Schwefelsäure, nur wird an der Kathode

statt H_2 Na_2, Natrium, abgeschieden. Dieses setzt sich aber mit dem Wasser um nach der Gleichung $Na_2 + H_2O = Na_2O + H_2$, so daß auch hier Wasserstoff entweicht, ganz wie bei der Schwefelsäure-Elektrolyse, und im ganzen wieder Wasserzersetzung, H_2- und O-Entwickelung das unmittelbar sichtbare Endergebnis ist. Gleichzeitig findet hier neben der Anhäufung von Schwefelsäure an der Anode Anhäufung von Natronlauge ($Na_2O + H_2O = 2\,NaHO$) an der Kathode statt, und beide Anhäufungen sind leicht durch Lackmuszusatz nachzuweisen. Die einfache Vorrichtung Abb. 105 ist dazu geeignet, indem eine zwischen die Elektroden eingeschobene, durchfeuchtete Pappwand — die den Stromdurchgang gut gestattet — die Vermischung der beiden Hälften der Lösung verhindert. Man findet, daß die vorher durch den Lackmuszusatz neutral rötlichblaue Lösung während der Elektrolyse an der Anodenseite zunehmend deutlich rot, an der Kathodenseite blau wird, während Sauerstoff und Wasserstoff an den Elektroden entweichen. Entfernt man schließlich die Pappwand, so kehrt bei Mischung die neutrale, rötlichblaue Färbung wieder zurück; es ist vom neutralen Glaubersalz nichts verloren gegangen.

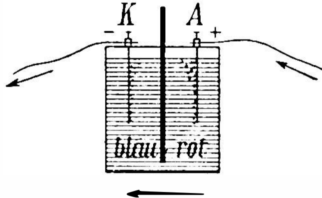


Abb. 105. Elektrolyse von Glaubersalzlösung mit Lackmus.

179. Elektrolysiert man eine Lösung von Kochsalz, NaCl, so wird, im Sinne des hier einzig möglichen Zerfalles, Na|Cl, an der Anode Chlor und an der Kathode Natrium abgeschieden, welches letztere aber mit dem Wasser der Lösung sofort Wasserstoff entwickelt. Es ist dies dasselbe Ergebnis wie bei Elektrolyse von Salzsäure, HCl: Entwickelung von Chlor an der Anode und Wasserstoff an der Kathode, nur daß das Ergebnis bei der Salzsäure unmittelbar, beim Kochsalz durch die hinzukommende sekundäre chemische Umsetzung zustande kommt.

180. Elektrische Ladungen in den Molekülen; die Jonen. — Die Frage: Warum die Bestandteile der Elektrolyten an die Elektroden wandern und zwar der eine Teil an die Anode, der andere an die Kathode, ist nach Bekanntem nur dahin zu beantworten, daß diese Teile elektrisch geladen sein müssen, so daß sie von den elektrischen Kräften zwischen den beiden Platten ganz so bewegt werden, wie etwa das Aluminiumblatt im heterostatischen Elektrometer (36, Abb. 70). Da die mit dem positiven Ende der Stromquelle verbundene Anode positive Ladung hat, müssen Sauerstoff, Säurereste, Haloide, weil sie an der Anode zur Abscheidung kommen, negative Ladung tragen, Metalle und Wasserstoff dagegen, die an der negativ elektrischen Kathode sich abscheiden, positive Ladung. Der Raum zwischen den Elektroden im Elektrolyten ist in der Tat ein elektrisches Feld; es laufen stets Kraftlinien von der Anode zur Kathode, wenn auch immer wieder neue, aus der Stromquelle nachkommende (161, 162), und die Spannung in der Flüssigkeit zwischen den Elektroden ist nach Ohms Gesetz durch Stromstärke und Elektrolytwiderstand gegeben. Diese Spannung zusammen mit der Strecke, auf welcher sie sich findet, bestimmt die Kraft (95), welche auf jede zwischen den Elektroden befindliche Ladungseinheit

ausgeübt wird. Unter dem Einfluß dieser Kraft bewegen sich also die entgegengesetzt geladenen Atome oder Atomgruppen im Elektrolyten bis sie an die Elektroden kommen, wo sie sich häufen (s. 196).

Es ist für diese elektrisch geladenen Teile der Moleküle des Elektrolyten der Name „Jonen" eingeführt, und zwar heißt Anion jedes zur Anode wandernde, also negativ geladene Jon, wie z. B. Cl, J, Br, SO_4, NO_3, HO, und Kation jedes zur Kathode wandernde, also positiv geladene Jon, wie H und alle Metallionen, auch H_4N.

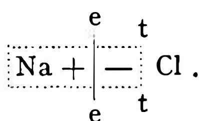
181. Chemische Kräfte als elektrische Kräfte. — Es bleibt die Frage: wie die Jonen zu ihren Ladungen kommen? Davy und Berzelius gaben vermutungsweise schon die Antwort: durch ihre gegenseitige Berührung im Molekül des Elektrolyten. So wie Kupfer und Zink in Voltas Versuch (130) bei der Berührung einander entgegengesetzt aufladen, so auch die verschiedenen Atomarten, wenn sie in genügend nahe Berührung miteinander kommen, wie es bei der Molekülbildung geschieht. Wenn beispielsweise das Natrium- und das Chlor-Atom zum Kochsalzmolekül, NaCl, sich vereinigen, wie es beim Verbrennen von Natriummetall in Chlorgas geschieht, so erhält dabei das erstere Atom positive, das zweite negative Ladung; das sind eben jene Ladungen, die dann bei der Elektrolyse durch die Abscheidung an den Elektroden merklich werden.

Ja, Davy und Berzelius dachten sogar schon, daß es eben diese, bei der Berührung angenommenen entgegengesetzten Ladungen der Atome seien, welche dieselben dann im Molekül durch ihre Anziehungskräfte zusammenhalten: „Chemische Kräfte sind elektrische Kräfte", war der Gedanke, den sie dann weiter verfolgten. Er hat sich durchaus bewährt (192, 201—208). Er ist in späterer Zeit sogar fast selbstverständlich geworden, nachdem die beiden Elektrizitäten als Grundbestandteile aller Atome erkennbar geworden waren (531).

182. Valenzelektronen. — Entsprechend dieser Zusammensetzung der Atome, ebenso wie nach aller weiteren Erfahrung über Elektrolyse erfolgt die gegenseitige Aufladung der Atome bei der Molekülbildung durch Übertritt eines Elektrons — oder deren mehreren — aus dem einen Atom ins Gefüge des anderen. Das erstere Atom, dem somit negative Elektrizität fehlt, ist dann positiv geladen, das andere negativ. Diese Ladungen behalten die Atome, wenn sie im Elektrolyten auseinandergehen, und so erscheinen sie — oder ihre Gruppen — als Kationen und Anionen, die dann durch die elektrischen Kräfte des Stromes an die Elektroden getrieben werden.

Solche aus einem Atom ins andere übertretende und dabei die Bindung der Atome an einander vermittelnde Elektronen werden (aus alsbald ersichtlichem Grunde, 190) „Valenzelektronen" genannt.

Solange das Molekül noch unzertrennt ist, sind seine Atome sehr dicht und innig vereinigt, wie es die verhältnismäßige Kleinheit der Moleküle zeigt (vgl. M 24, Tab. 1). Wie dabei die Elektrizitäten im Molekül etwa räumlich angeordnet sind, ist eine besondere Frage; es kann aber eine einfache schematische Darstellung gegeben werden, welche besonders die durch die Elektrolyse gelieferte Einsicht hervorhebt — beispielsweise für das Kochsalzmolekül NaCl, wie es im Kochsalzdampf vorhanden ist — durch die Schreibweise:



Die Punktierung umfaßt dabei alles, was zum vollständigen, elektrisch neutralen Na-Atom gehört. Die Zeichen + — bedeuten zwei entgegengesetzte elektrische Elementarquanten aus dem Bestand des Na-Atoms, während das Zeichen Na alles sonst noch zu diesem Atom gehörige darstellt. Der vertikale Strich e e zeigt die Trennung, wie sie in den Jonen der Kochsalzlösung vorliegt.

Das negative Elementarquant am Cl, welches die Bindung mit dem Natriumatom bewirkt hat und welches nach der Jonentrennung e e beim Cl bleibt, ist das Valenzelektron des Na-Atoms.

Valenzelektronen, deren ein Atom eins oder mehrere haben kann — je nach seiner „Valenz" oder „Wertigkeit" (190) — sind, wie eben die Trennung in den Jonen zeigt, leicht abtrennbare Elektronen der betreffenden Atome, und eben in dieser leichten Abtrennbarkeit liegt der elektropositive Charakter des betreffenden Elements, z. B. des Natriums. Elemente mit elektronegativem Charakter, wie das Chlor, halten dagegen an ihren Atomen eigene sowie auch fremde Elektronen gut fest (vgl. 136, 201, 204).

183. Das Entgegengesetzt-Geladensein der Atome oder Atomgruppen in den Molekülen ist auch in Übereinstimmung mit den Erfahrungen über die chemischen Wirkungen des Lichtes (O 92). Außerdem besteht der nach der ursprünglichen Vermutung (181) zu erwartende Zusammenhang mit der Spannungsreihe (136), insofern die am positiven (oberen) Ende derselben stehenden Elemente nur als Kationen, d. i. mit positiver Ladung, bei Elektrolysen auftreten, nicht als Anionen, wie es sein muß, wenn sowohl in Voltas Grundversuch (130) als auch bei der Molekülbildung Elektronenübertritte die Ladungen hervorbringen. Durch diese Übereinstimmung gibt die Elektrolyse ein Mittel, noch in anderer Weise als durch Voltas Grundversuch zu erfahren, welche Atome leicht Elektronen abgeben, also ans positive Ende der Spannungsreihe gehören, elektropositiven Charakters sind, und welche im Gegenteil Elektronen stark festhalten und somit ans negative Ende der Reihe gehören, elektronegativen Charakters sind (138). Ersteres sind die als Kationen, letztere die als Anionen auftretenden Atome. Quantitative Unterschiede, welche die Reihenfolge der Einordnung bestimmen, ergeben sich später (201, 203, 204, s. auch 472). In dieser Weise ist auch die in Tab. 43 gegebene Spannungsreihe ergänzt.

184. Elektrolytische Dissoziation. — Die zwischen den Elektroden in der Flüssigkeit vorhandenen elektrischen Kräfte können zwar die Jonen zu den Wanderungen nach den Elektroden hin bringen, sie können aber nicht die Zertrennung von Molekülen in die Jonen, also nicht die Entstehung von Jonen bewirken. Denn zu solcher Zertrennung werden Kräfte von bestimmter Mindestgröße erforderlich, wogegen nach Faradays erstem Gesetz der Elektrolyse schon der schwächste Strom, also — nach Ohms Gesetz — schon die schwächste Kraft im Elektrolyten mit entsprechender, dem Strom proportionaler Jonenabscheidung verbunden ist.

Die Jonen müssen daher schon von vornherein getrennt im Elektro-

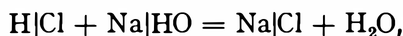
lyten vorhanden sein. Dies ist durch besondere Nachweise gesichert (185) und ist auch mit aller sonstigen Erfahrung im Einklang. Man nennt den Zerfall der Moleküle in ihre entgegengesetzt geladenen Jonen, entsprechend der Trennung bei e e im Schema von 182, „elektrolytische Dissoziation" (vgl. dazu die „thermische Dissoziation", welche der Trennung bei t t entspricht, W 124, E 201).

Ein Elektrolyt kann geradezu als ein Stoff bezeichnet werden, der freie, bewegliche Jonen enthält: der elektrolytisch dissoziiert ist. Wasser ist kein Elektrolyt oder kaum ein solcher, weil die H_2O-Moleküle höchstens spurenweise in Jonen, H und HO, zerfallen; dagegen sind alle Salze in wäßriger Lösung elektrolytisch dissoziiert, ebenso auch geschmolzene Salze.

185. Von den besonderen Erfahrungen, die als Nachweise der elektrolytischen Dissoziation dienen können, seien folgende genannt:

1. Die Methode der Siedepunktserhöhung (W 223) gestattet die Zahl der selbständig beweglichen, gelösten Moleküle in einer Flüssigkeit festzustellen, und man findet z. B. in einer KCl-Lösung, wie auch in sonstigen nicht zu konzentrierten wäßrigen Salzlösungen, die Zahl der aufgelösten Moleküle verdoppelt. Dies weist nach, daß jedes dieser Moleküle in zwei selbständig bewegliche Teile zerfallen ist. Die Elektrolyse zeigt eben die Jonen als diese Teile.

2. Vermischt man genügend verdünnte wäßrige Lösungen einer Säure und einer Base, so daß Neutralisation eintritt, so erhält man Wärmeentwicklung, wie meist bei der Bildung neuer Moleküle (W 128). Die Menge der entwickelten Wärme hängt stets von Zahl und Art der neugebildeten Moleküle ab, wobei auch noch Zahl und Art der gleichzeitig etwa zersetzten Moleküle zu berücksichtigen ist. Im gedachten Fall der Säuren und Basen ist es aber sehr bemerkenswert, daß die entwickelte Wärmemenge bei gleicher umgesetzter Molekülzahl einwertiger Stoffe in allen Fällen sehr nahe die gleiche ist, obgleich je nach Art der benützten Säure und Base sehr verschiedene Salze gebildet werden. Betrachtet man als Beispiel einer solchen Neutralisation den Fall von Salzsäure und Natronlauge, so hat man die Umsetzung



$$H|Cl + Na|HO = Na|Cl + H_2O,$$

und man sieht, was für alle anderen Fälle ebenso gilt, daß — wenn die elektrolytischen Dissoziationen nach den vertikalen Strichen Wirklichkeit sind — überhaupt nichts zersetzt wird, was nicht schon vorher zerfallen war, und daß nichts neu gebildet wird als nur das Molekül H_2O. Letzteres ist aus den Jonen H und HO entstanden, deren Vereinigung die Wärmeentwicklung ergibt. Die Jonen Na und Cl sind nach wie vor in der Flüssigkeit getrennt, ganz unverändert vorhanden; Moleküle des Salzes, NaCl, kämen überhaupt erst beim Eindampfen der Lösung zustande. Benützt man eine zweiwertige Säure, z. B. H_2SO_4, so wird bei gleicher Molekülzahl die doppelte Wärmemenge entwickelt; es wird aber auch doppelt so viel Wasser gebildet. Die Wärmeentwickelungen in diesen nicht zu konzentrierten Lösungen entsprechen also durchaus dem, was die elektrolytische Dissoziation, und zwar vollständige Dissoziation aller gelösten Moleküle erwarten läßt.

3. Bemerkenswert ist auch die Farbe der Jonen. Alle Eisenoxydsalzlösungen sind braun, alle Kupferoxydsalzlösungen grünblau, alle Permanganatlösungen

purpurviolett. Das Gemeinsame, die gemeinsame Farbe Bedingende, ist jeweils das Ion (Fe, Cu, MnO_4), dem offenbar die betreffende Lichtabsorption zugehört.

186. Der elektrische Strom in den Elektrolyten. — Da somit in jedem Elektrolyten bereits von vornherein die getrennten Ionen vorhanden sind, geschieht beim Anlegen der Spannung weiter nichts als daß die Ionen nach ihren betreffenden Elektroden hin zu wandern beginnen. In dieser Wanderung der Ionen besteht aber auch der Strom selber; jede Elektrizitätsbewegung in einem Elektrolyten ist nichts weiter als Wanderung seiner Ionen. Dies ist durch Faradays erstes Gesetz (174) gesichert: Die ausnahmslose Proportionalität von Ionenabscheidung und Strom zeigt, daß keine Elektrizitätsmenge anders als mit Ionen durch den Elektrolyten gehen kann.

In den Elektrolyten ist damit die Art der Elektrizitätsbewegung beim Stromdurchgang vollkommen klar geworden. Es bewegen sich hier beide Elektrizitäten, in entgegengesetzter Richtung, und zwar sind beide von denjenigen Atomen oder Atomgruppen getragen, welche wir als Ionen bezeichnet haben. Elektrizitätsdurchgang ohne Transport von Materie, mittels Elektronenbewegung, wie in den Metallen, kommt bei keinem guten Elektrolyten vor; er würde Faradays erstem Gesetz widersprechen.

187. Physiologische Wirkungen der Elektrizität sind stets als chemische Wirkungen oder genauer als Ionenverschiebungen aufzufassen. Denn sie gehören nur der bewegten Elektrizität zu (27), und da die für Elektrizitätsbewegung in Betracht kommenden Teile aller Organismen von Elektrolyten durchtränkt sind und in getrocknetem Zustand kaum Leitvermögen haben, so ist die Elektrizitätsbewegung in ihnen stets Ionenverschiebung. Die physiologischen Stromwirkungen, wie Muskelzuckung, können also nur Folge von Ionenverschiebung in den Geweben sein. Bei sehr schnell wechselnder Spannung, wobei die Ionen nicht weit folgen können, fehlt dementsprechend die physiologische Wirkung (401).

Wir haben schon bei Betrachtung der Nerven- und Muskeltätigkeit bemerkt (M 283), daß dieselbe in Verschiebungen der Atome der Nerven- und Muskel-Moleküle bestehen müsse; verschieben sich diese Atome mit elektrischer Ladung, so ist auch die normale Nerven- und Muskeltätigkeit derselbe Vorgang, wie die Reizung durch von außen beigebrachte elektrische Spannung, wenn auch in anderer Weise verlaufend.

Da trockene Haut sehr schlecht leitet, bedarf es nach Ohms Gesetz hoher Spannung, um physiologische Wirkung durch angelegte Elektroden hervorzubringen; bei feuchten Berührungsstellen können dagegen schon verhältnismäßig niedrige Spannungen bei ergiebiger Stromquelle unangenehm oder gar lebensgefährlich werden. Allmählich gesteigerten Strömen vermag der Organismus in gewissem Maße sich anzupassen.

188. Chemisch gleichwertige Abscheidungen; Faradays zweites Gesetz der Elektrolyse. — Elektrolysiert man bei gleicher Stromstärke, am besten durch denselben, unverzweigten Strom, verschiedene Stoffe, so findet man die durch denselben Strom in gleichen Zeiten abgeschiedenen Mengen chemisch gleichwertig (äquivalent). Dies ist Faradays zweites Gesetz der Elektrolyse.

Als „chemisch gleichwertig" oder „äquivalent" sind dabei Stoffmengen zu verstehen, die chemisch das gleiche bewirken können, z. B. die eine und dieselbe Menge eines anderen Stoffes binden können.

Man versteht, daß bei Nachweis dieses Gesetzes die so oft bei Elektrolysen mitwirkenden sekundären chemischen Vorgänge an den Elektroden (177) nicht täuschen können; denn chemische Vorgänge vertauschen immer nur äquivalente Stoffmengen miteinander. Sind also die an den Elektroden aufgefangenen, vielleicht nur sekundär entwickelten Mengen aus verschiedenen Elektrolyten

chemisch gleichwertig, so waren es auch die ursprünglich abgeschiedenen Jonenmengen. Wenn z. B. aus NaCl-Lösung H und Cl aufgefangen wird (179), so ist doch die Wasserstoffmenge der verschwundenen Natriummenge äquivalent, und man kann ebensogut annehmen, es wäre Salzsäure der Elektrolyt gewesen. In dieser Weise ist auch das folgende Beispiel am einfachsten zu deuten.

189. Es werde in drei hintereinander geschalteten Zersetzungszellen, Abb. 106a, b, c, Salzsäure, Wasser und Ammoniak gleichzeitig durch denselben Strom der Elektrolyse unterworfen. Die abgeschiedenen Mengen sind dabei alle gasförmig und daher leicht nach Volum zu vergleichen. Betrachtet man zunächst jede Zelle

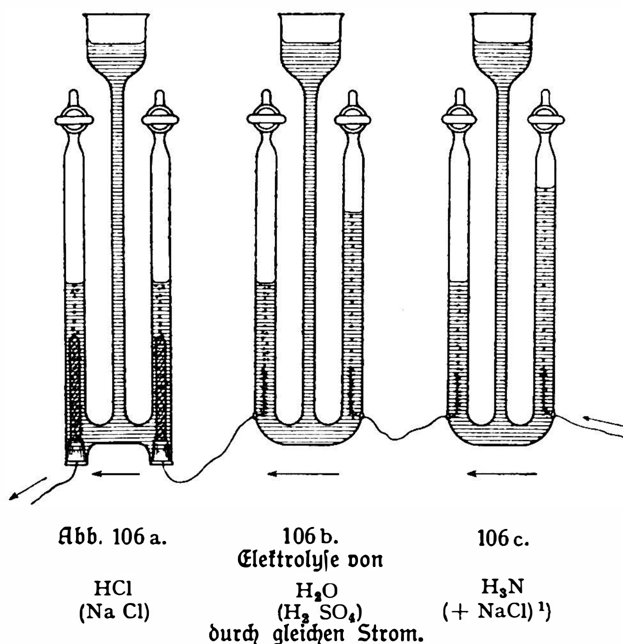


Abb. 106a. 106b. 106c.
Elektrolyse von
HCl (Na Cl) — H_2O (H_2SO_4) — H_3N (+ NaCl)[1]
durch gleichen Strom.

einzeln, so sieht man, daß die abgeschiedenen Gasvolume jeweils in dem zu erwartenden Verhältnis stehen, nämlich 1:1[2]), $1:\frac{1}{2}$, $1:\frac{1}{3}$, wie sie in Salzsäure, Wasser, Ammoniak enthalten sind. Vergleicht man weiter die drei Zellen miteinander, so sieht man, daß überall gleichviel Wasserstoff abgeschieden ist, und dies entspricht dem vorangestellten Gesetz; denn von einem und demselben Stoff sind gleiche Mengen gleichwertig. Ebenso sind aber auch die drei Mengen des Chlors, Sauerstoffs, Stickstoffs chemisch gleichwertig; denn es sind Mengen, die gleichviel Wasserstoff zu binden vermögen, wie es in den elektrolysierten Verbindungen tatsächlich der Fall war.

190. Die chemische Wertigkeit oder der Bindungswert — auch Valenz genannt — ist übrigens für jedes Element, auch jede Atomgruppe,

---

[1]) Hier wirkt an der Anode der sekundäre Vorgang: $3\,Cl + 4\,H_3N = N + 3\,H_4NCl$.

[2]) Man findet das richtige Volum des Chlors nur bei vorhergegangener vollständiger Sättigung des die Anode umgebenden Elektrolyten mit Chlorgas; andernfalls erscheint immer zu wenig Chlor, weil die Flüssigkeit viel davon absorbiert.

aus umfassender chemischer Erfahrung bekannt. Man weiß, daß Chlor gewöhnlich einwertig, Sauerstoff zweiwertig, Stickstoff dreiwertig ist, d. h., daß 1 Atom Sauerstoff 2 Atomen Chlor, 1 Atom Stickstoff 3 Atomen Chlor gleichwertig ist.

Es verhalten sich danach gleichwertige Atomzahlen der drei Elemente Cl, O, N wie $1:\frac{1}{2}:\frac{1}{3}$. Wie die Atomzahlen müssen sich aber nach Avogadros Gesetz (W 82) auch die Volume im Gaszustand verhalten, weil alle drei Gase zweiatomig sind (W 122), und dem entsprechen auch die im Versuch (189) gefundenen Volume.

Daß die meisten Elemente mehrere Wertigkeiten haben können[1]), stört bei Anwendung von Faradays zweitem Gesetz nicht; es kommt stets nur auf die in der elektrolysierten Verbindung wirklich betätigte Wertigkeit an (vgl. 191).

191. Weitere Prüfungen des Gesetzes. — Wie im Vorhergehenden (189), so sind durch Volum- oder Gewichtsbestimmung auch viele andere Elektrolysen vergleichend untersucht. Mit besonderer Genauigkeit ist dies für die Abscheidung von Kupfer und Silber im Vergleich mit Wasserstoff (oder Knallgas) geschehen, wodurch auch die Strommessung mit dem Kupfer- und Silbervoltameter (175) gesichert ist.

Silber ist chemisch einwertig wie Wasserstoff; es wird daher durch denselben Strom auf je 1 Atom Wasserstoff 1 Atom Silber abgeschieden werden, d. i. auf je 1 gr Wasserstoff 107 gr Silber, wonach man leicht — unter Berücksichtigung der Zusammensetzung des Knallgases und der spezifischen Gewichte der Gase — vom Knallgasvoltameter auf das Silbervoltameter, oder umgekehrt, umrechnet, wenn etwa die Festhaltung der Stromeinheit in Betracht kommt (vgl. 175).

Kupfer ist im Kupfervitriol, wie in allen Kupri-Salzen zweiwertig, somit werden mit je 1 Atom Kupfer gleichzeitig 2 Atome Silber abgeschieden, also mit 63 gr Kupfer $2 \cdot 107$ gr Silber. Das Silbergewicht ist hiernach mehr als dreimal so groß als das Kupfergewicht, weshalb das Silbervoltameter auch die entsprechend genauere Strommessung, bzw. Festhaltung der Stromeinheit, gestattet.

Elektrolysiert man ein Kupro-Salz, z. B. Kupferchlorür, $CuCl$, so erhält man im Vergleich zu $CuSO_4$ oder $CuCl_2$ die doppelte Kupfermenge, weil das Kupro-Kupfer einwertig ist.

192. Die Jonenladungen und die Valenzen der Atome. — Die Frage nach der Größe der elektrischen Ladung der verschiedenen Jonenarten ist nach Faradays zweitem Gesetz dahin zu beantworten, daß die Ladung stets nach der chemischen Wertigkeit (190) des Jons sich richtet. Einwertige Jonen tragen eine bestimmte, einfache Ladung, zweiwertige die doppelte, dreiwertige die dreifache Ladung. Eben dadurch, sowie auch schon durch das Zeichen ihrer Ladung, ob Anion oder Kation (180), sind Jonen sowohl in ihrem chemischen als auch zugleich in ihrem elektrischen Verhalten charakterisiert, ganz entsprechend der elektrischen Natur der chemischen Kräfte (181).

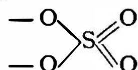
Man hat aus chemischer Erfahrung, seit Molekulargewichte und Atomgewichte mit Sicherheit ermittelbar wurden und also die Zusammensetzung der Moleküle ergründbar wurde, jedem Atom „Valenzstellen" oder besser „Valen-

[1]) Vgl. die Atomtabelle (M 24), in welcher oben die vorkommenden Valenzzahlen der darunter verzeichneten Atome angegeben sind; s. dazu 192.

zen"[1]) zugeschrieben, mit Hilfe deren es andere Atome im Molekül zu binden vermag. Je eine Valenz des einen und eine des anderen Atoms bewirken zusammen diese Bindung; die zwei Valenzen „sättigen einander ab", was in den „Strukturformeln" der Chemie durch die Bindungsstriche zum Ausdruck kommt.

Die Zahl der Valenzen eines Atoms ist dasselbe wie seine schon betrachtete Wertigkeit oder sein „Bindungswert" (190); sie ist, wie wir nun sehen, auch gegeben durch die Größe seiner Ionenladung. Ionen, die Atomgruppen sind, wie das Anion der Schwefelsäure, SO_4, haben Ladungen, die durch die Zahl der überschüssigen, nicht abgesättigten Valenzen der Gruppe bestimmt

sind, was durch die Struktur-Schreibweise



zum Ausdruck kommt; es sind hier die beiden negativen Valenzen der O-Atome noch frei, was die Gruppe als zweiwertiges Anion erkennen läßt.

Es sind nicht immer alle Valenzen eines Atoms gleichzeitig betätigt, wie z. B. das Kupferatom sowohl zweiwertig, d. i. mit zwei beteiligten Valenzen und also doppelter Ionenladung, als auch einwertig, d. i. mit Betätigung nur einer Valenz und also einfacher Ionenladung auftreten kann (191).

Haben die bei einer Bindung einander absättigenden Valenzen der betreffenden Atome deutlich elektrisch entgegengesetzten Charakter im Sinne von Voltas Spannungsreihe (138, 183) — elektropositiv oder metallisch die einen, elektronegativ oder metalloid die anderen —, so erfolgt die Bindung nach den Erfahrungen der Elektrolyse mittels eines Valenzelektrons des metallischen Atomes, wie es am Beispiel des Moleküls NaCl erläutert wurde (182). Jede elektropositive, metallische Valenz eines Atoms bedeutet demnach ein leicht abtrennbares Valenzelektron in ihm; jede elektronegative, metalloide Valenz bedeutet ein vom Atom aufzunehmendes und gut festzuhaltendes Elektron.

Es gibt Atome, die sowohl elektropositive als elektronegative Valenzen haben, so beispielsweise das Schwefelatom, das im Schwefelsäureanhydrid, SO_3, 6 metallische (sauerstoffbindende), positive Valenzen betätigt (vgl. die Strukturformel oben), im Schwefelwasserstoff H_2S dagegen 2 metalloide (wasserstoffbindende), negative Valenzen.

Es haben aber nicht alle Valenzen von Atomen, die aus den Tatsachen der Molekülbildung erschlossen sind, deutlich elektropositiven oder elektronegativen Charakter; so besonders die 4 Valenzen des Kohlenstoffatomes in Bindungen mit seinesgleichen. Über solche Valenzen kann Elektrolyse nichts aussagen, weil sie nicht ionenbildend wirken.

In unserer Atomtabelle (M 24) sind oben die meistbetätigten Valenzen der darunter verzeichneten Atome nach Charakter (durch die Zeichen + und —) und Zahl angegeben. Für die im allgemeinen selten vorkommenden Fälle sind kleinere Zeichen und Zahlen gewählt; übrigens scheinen für jedes Element alle unter der Höchstzahl seiner Valenzen liegenden Valenzzahlen gelegentlich betätigt vorzukommen. Die erste Spalte der Tabelle enthält die nullwertigen Edelgase, die gar keine deutliche Bindungsfähigkeit zeigen und daher die Valenzzahl Null haben (siehe hierzu auch 570).

Daß es auch Atombindungen anderer Art als die im Vorstehenden betrachteten gibt, die man weniger zu deuten weiß, die aber auch durch elektrische (und magnetische) Kräfte bedingt sein dürften, dies ist nach dem gut sichergestellten Aufbau aller Atome aus den elektrischen Elementarquanten (531 u. f.), der bei nicht ganz kleinen Atomgewichten viele Möglichkeiten

---

[1]) Wir sagen lieber „Valenzen" statt „Valenzstellen" der Atome, weil man in einem wenig bekannten und wohl auch innerlich bewegten Gebäude nicht gut bestimmte „Stellen" angeben kann; der Ausdruck „Valenz" bezeichnet genügend die hier zu erläuternden, durch Erfahrung festgestellten Eigentümlichkeiten der Atome.

für solche Kräfte übrig läßt, ohne weiteres verständlich. Solche Bindungen finden sich z. B. in den mehratomigen Molekülen der Elemente, wie H_2, O_2, N_2. Es gehören aber auch viele andere Molekülbindungen dazu, auch solche, die nicht nach festen Mengenverhältnissen stattfinden, wie z. B. die Zusammenlagerungen von Wassermolekülen mit Alkoholmolekülen, die durch Volumverminderung beim Mischen der beiden Flüssigkeiten so deutlich sich zeigen. Letztere Fälle zeigen schon den stetigen Übergang von den chemischen Kräften zu den Molekularkräften, der auch bei den Atombindungen in den Kristallgittern der festen Stoffe sich zeigt (s. M 250). Die Tatsache solchen Überganges macht es klar, daß der Begriff der Valenzen der Atome nur der vereinfachten Erfassung eines Teils des tatsächlich verwickelten Verhaltens der Atomkräfte dient, so daß er der Natur der Sache nach von etwas unbestimmter Bedeutung sein muß. Es entsprechen dem die am Kopfe der Atomtabelle vermerkten mehrfachen Valenzzahlen, die keine große Regelmäßigkeit ersehen lassen (vgl. dazu 570).

193. Das elektrische Elementarquant. — Wir kommen hier an den Anfang der Begründung der schon eingangs (1, 2, 12) vorweggenommenen und dann dauernd schon benutzten wichtigen Erkenntnisse über die Natur der Elektrizität selbst.

Die Tatsache des Verbundenseins der Jonenladungen mit den ihrer Bedeutung nach stets ganzzahligen Valenzen der Atome (192), wonach positive sowie negative Jonenladungen nur als ganzzahlige Vielfache derjenigen Elektrizitätsmenge vorkommen, die bei allen einwertigen Jonen sich findet, gab schon früh — seit Faradays zweitem Gesetz der Elektrolyse (1833) — Anhalt zu einer Vermutung über die Natur der Elektrizität selbst: daß sie nämlich in bestimmte Elementarquanten abgeteilt gegeben sei, wie die Materie in die Atome abgeteilt gegeben ist. Das Elementarquant wäre die Ladung eines einwertigen Jons, z. B. des Wasserstoffions, und die mehrwertigen Jonen tragen ein der Wertigkeit entsprechendes Vielfaches dieses Elementarquants, sei es positiver oder negativer Elektrizität. Die Entstehung der Jonen beiderlei Zeichens aus elektrisch neutralen Molekülen (184, 199) zeigt dabei, daß die Elementarquanten beiderlei Zeichens gleiche Elektrizitätsmengen bedeuten (vgl. 8).

In der Tat müssen alle beliebig großen Elektrizitätsmengen, die als elektrische Ströme durch Elektrolyten gehen, aus solchen Elementarquanten bestehen; denn sie werden alle — wie wir sahen (186) — von Jonen getragen.

Ob aber auch die sonst vorkommenden Elektrizitätsmengen an und in Metallen oder in Gasen aus denselben Elementarquanten zusammengesetzt oder überhaupt bestimmt unterteilt sind, dies mußte mangels irgendwelcher Anzeichen fraglich bleiben; es war sogar eine Zeitlang eine fernliegende Frage geworden, weil „Elektrizität" immer nur an geladenen Körpern wahrnehmbar wurde durch ihre Kräfte, oder als Strom in Leitern durch dessen besondere Wirkung, niemals aber für sich allein, so daß man mit Recht geneigt sein konnte, die Elektrizität nur als eine Hilfsvorstellung aufzufassen, nicht als ein Naturding, nach dessen etwaiger Mengenunterteilung oder sonstiger näherer Beschaffenheit zu fragen wäre.

Dies wurde anders, als man (seit 1894) durch das Studium der Kathodenstrahlen die eine Elektrizität, die negative, für sich, abgetrennt von Materie kennenlernte, ihre Bewegungen verfolgen, ihre Masse (Trägheit) messen konnte, auch ihre Verschiedenheit von der positiven Elektrizität (12) kennenlernte und die beiden Elektrizitäten als Bestandteile aller Atome erkannte (452 u. f.). Von da ab war die Elektrizität selber, vor allem die negative, auch der weiteren

Untersuchung gut zugänglich geworden. Als Bestandteile der Atome mußten die Elektrizitäten irgendwie in kleinen Mengen abgeteilt vorhanden sein, und es zeigten sich bald mehrere Möglichkeiten, kleinste vorkommende Elektrizitätsmengen auch anders als an den Jonen der Elektrolyse zu messen, besonders an Elektrizitätsträgern in Gasen (195, 514). Diese Mengen zeigten sich in der Tat gleich der Ladung des Wasserstoffions oder als ganzzahlige Vielfache derselben; dadurch war die Zusammensetzung aller vorkommenden Elektrizitätsmengen aus solchen einander gleichen Elementarquanten beiderlei Zeichens genügend nachgewiesen, um sie allen Überlegungen über Elektrizität mit Überzeugung und dann auch mit greifbarem Erfolg zugrunde legen zu können, wie wir das von Anfang schon vorweggenommen und durchgeführt haben.

194. Die Berechnung der Größe des Elementarquants in elektrischen Mengeneinheiten aus den Angaben der Elektrolyse war möglich, seit die Kenntnis der Molekularbewegung in Gasen (W 81 u. f.) die absoluten Gewichte der Atome ermittelbar gemacht hatte (Loschmidt 1865, dann in steter Verbesserung, W 102, 103)[1]). Es scheidet — in den heute gebräuchlichen Einheiten — 1 Weber in 1 sek 1·118 mgr Silber an der Kathode aus (175, 293); diese Silbermenge trägt somit in Jonengestalt 1 Coulomb Elektrizität. Denn es treten an die Kathodenoberfläche nur diese Silberionen mit ihrer positiven Ladung heran; Anionen mit negativer Ladung kommen hier nicht in Betracht, weil keine solchen aus der Kathodenoberfläche heraustreten. Wiegt 1 Wasserstoffatom $1{\cdot}67 \cdot 10^{-24}$ gr (was gegenwärtig bis auf einige Ungewißheit in der zweiten Dezimalstelle 7 gesichert ist), so ist das 107mal so große absolute Atomgewicht des Silbers $179 \cdot 10^{-24}$ gr, und dies ist die Silbermenge, die als Jon 1 Elementarquant Elektrizität trägt. Da aber 1·118 mgr Silber zusammen 1 Coulomb tragen, so ist die auf das einzelne Jon entfallende Elektrizitätsmenge, das Elementarquant, $e = 179 \cdot 10^{-24}$ gr/(1·118 mgr/Coulomb) $= 16 \cdot 10^{-20}$ Coulomb oder in der $3 \cdot 10^{9}$mal kleineren elektrostatischen CGS-Einheit (15) $4{\cdot}8 \cdot 10^{-10}$.

Diese Menge ist so klein, daß es bei allen gewöhnlichen Beobachtungen ganz unmerklich bleiben muß, ob sie die kleinste mögliche Abstufung ist, in welcher Elektrizitätsmengen vermehrt oder vermindert werden können — wie bei den Jonen —, oder ob es noch kleinere Elektrizitätsmengen gibt. Nur wenn Mengen beobachtet werden, die selber im ganzen nicht sehr viele Elementarquanten umfassen, kann diese Frage entschieden werden.

195. Verfeinerte Ermittelung und Sicherung des Elementarquants. — So kleine Elektrizitätsmengen finden sich bei den schon erwähnten Elektrizitätsträgern in Gasen. Solche Träger, bewegliche Ladungen, können beispielsweise kleine Tröpfchen von zerstäubter Flüssigkeit sein, die ihre Ladung aus der Doppelschicht an der Flüssigkeitsoberfläche haben und die sich lange in der Luft erhalten (134). Man kann solche Tröpfchen mit einem horizontalen Mikroskop beobachten, während sie infolge ihrer Schwere langsam nach unten sinken. Aus der Geschwindigkeit ihrer Abwärtsbewegung findet man bei Kenntnis des spezifischen Gewichts der zerstäubten Flüssigkeit das Gewicht des beobachteten Tröpfchens (M 409, 411, W 109, 110). Schaltet man dann zwischen vorgesehenen

[1]) Wir führen die Rechnung hier mit den gegenwärtig verfügbaren, genaueren Zahlenangaben durch.

horizontalen Kondensatorplatten — eine oberhalb, eine unterhalb des Tröpfchens — ein elektrisches Feld mit vertikalen Kraftlinien in der Umgebung des Tröpfchens an, so daß dasselbe infolge seiner Ladung eine Kraft nach oben erfährt, so kann es zum Schweben kommen. Tritt dieser Fall ein, so ist diese Kraft gleich dem Gewicht des Tröpfchens und somit bekannt, und aus der Kraft und der aus Spannung und Abstand der Kondensatorplatten bekannten Feldstärke ist die Ladung des Tröpfchens berechenbar (95). Solche Ladungsmessungen sind in sehr großer Zahl ausgeführt worden. Die kleinste hierbei gefundene Ladung, deren ganzzahlige Vielfache alle die anderen gefundenen Ladungen sind, ist das Elementarquant.

Dies ist die unmittelbarste Meßweise des Elementarquants e. Sie ermöglichte auch die Überzeugung, daß das Elementarquant nicht etwa ein Durchschnittswert beträchtlich verschieden großer Einzelladungen der Jonen ist, sondern daß die einzelnen Elementarquanten alle entweder genau oder doch sehr nahe einander gleich sind. Das Ergebnis dieser unmittelbaren Messung (Tab. 45)

Tab. 45. **Grundzahlen für Materie und Elektrizität.**

Zahl der Gasmoleküle im cm^3 bei 1 Atm. u. 0°C [1])	$N_0 = 28 \cdot 10^{18}\ cm^{-3}$
Gewicht des Wasserstoffatoms [1])	$H = 1{\cdot}6 \cdot 10^{-24}$ gr
Elementarquant der Elektrizität [2])	$e = 16 \cdot 10^{-20}$ Coulomb
Masse des Elektrons [3])	$m_0 = 0{\cdot}9 \cdot 10^{-27}$ gr

[1]) Aus den Gasgesetzen und der Kenntnis der Bewegung der Gasmoleküle; verbessert nach den unmittelbaren Messungen von e (siehe W 102, 104).

[2]) Aus Faradays 2. Gesetz der Elektrolyse und aus H zuerst zu schließen gewesen; später durch unmittelbare Messungen an Elektrizitätsträgern in Gasen bestätigt und genauer ermittelt (siehe 194, 195).

[3]) Erst aus den Messungen an Kathodenstrahlen (und aus e) ermittelbar geworden (siehe 458, 479).

stimmt mit der vorher (194) berechneten Ladung des einwertigen Jons überein, soweit die Genauigkeit der zu letzterer Berechnung verfügbaren Kenntnis der absoluten Atomgewichte geht. Die Genauigkeit der unmittelbaren Meßweise ist größerer Steigerung fähig; man kann daher nach der erlangten Überzeugung von der Einheitlichkeit der Elementarquanten die Rechnung an den Jonen (194) umkehren und dadurch verbesserte Werte der absoluten Atomgewichte auf Grund des gemessenen Elementarquants finden, was wir in der Wärmelehre schon bemerkt haben (W 104).

Eine ganz andere Ermittlungsweise des Elementarquants mit wieder übereinstimmendem Ergebnis ist später anzugeben (550).

196. Wanderungsgeschwindigkeiten der Jonen. — Der elektrische Strom im Elektrolyten besteht, wie wir sahen (186), nur in der Wanderung

der Jonen. Die entgegengesetzt gerichteten Kräfte, welche zwischen den Elektroden auf die beiden, entgegengesetzt gleich geladenen (193) Jonenarten wirken, sind einander an Größe gleich. Daraus folgt aber noch nicht, daß auch die Wanderungsgeschwindigkeiten der beiden Jonenarten unter dem Einfluß dieser Kräfte gleich groß seien; denn es können ihre Bewegungswiderstände infolge verschiedener Beschaffenheit verschieden groß sein.

Eine Verschiedenheit der Wanderungsgeschwindigkeiten hat Konzentrationsverschiebung im Elektrolyten zur Folge, wie folgende Überlegung zeigt. Es befinde sich in Abb. 107 ein Elektrolyt, z. B. wäßrige Salzsäure, zwischen der Anode A und der Kathode K; die Zeichen + mögen ebensoviele H-Kationen und die Zeichen — die in gleicher Zahl vorhandenen Cl-Anionen bedeuten. 107a stellt den Anfangszustand vor Anschaltung des Stromes dar; man sieht, daß rechts und links von der gestrichelt angedeuteten Mitte des Elektrolyten gleichviel, wenn auch dissoziierte, HCl-Moleküle vorhanden sind. Wird nun der Strom in Gang gesetzt und wandern beide Jonenarten mit gleicher Geschwindigkeit, so entsteht die Verteilung 107b. Eine Anzahl Jonen beiderlei Zeichens (in der Abbildung je 5) sind gegen die Elektroden gegangen, wo infolge ihres

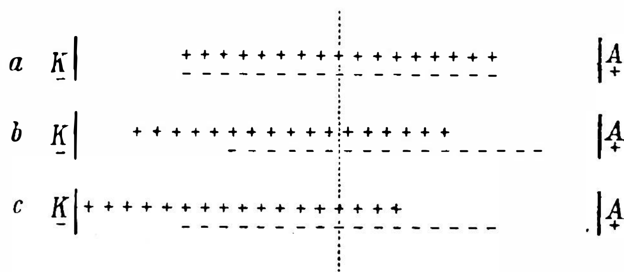


Abb. 107. Jonen-Wanderungen.

Ladungsüberschusses ein verstärktes Feld entsteht, das sie mit entsprechend vermehrter Geschwindigkeit wandern und bald bis an die Elektroden kommen läßt (vgl. 202). Die symmetrische Verteilung des Restes des Elektrolyten hat sich dabei nicht geändert. Wandern jedoch die beiden Jonenarten ungleich schnell, so entsteht eine andere Verteilung. Liegt beispielsweise der Grenzfall des ganz vorwiegenden Wanderns nur der einen Jonenart vor, etwa der positiven, so stellt Abb. 107c das Ergebnis dar. Es sind wieder gleichviel Jonen beiderlei Zeichens (in der Abbildung je 5) gegen die Elektroden gegangen; aber der Rest des Elektrolyten ist jetzt ungleich in den beiden Hälften der Flüssigkeit verteilt; es ist viel mehr davon an der Kathodenseite übrig als an der Anodenseite. Die Endverteilung, wie sie auch sei, kann — ohne wesentliche Verwischung durch Diffusion — ermittelt werden, wenn das Gefäß durch eine poröse Scheidewand in zwei Hälften geteilt ist, entsprechend der gestrichelten Linie in der Abb. 107. Man kann auch mehrere Scheidewände anbringen und die Verteilung durch quantitative Analysen beliebig im einzelnen studieren.

Aus solchen Versuchen ergaben sich Verhältniszahlen der Wanderungsgeschwindigkeiten der verschiedenen Jonenarten in wäßriger Lösung, wie sie in Tab. 46 zusammengestellt sind.

Tab. 46. **Wanderungsgeschwindigkeiten einwertiger Jonen.**

K	Na	Li	Ag	H	NH_4
65	44	36	56	318	64
Cl	Br	J	HO	NO_3	$C_2H_3O_2$
66	67	67	174	61	34

Absolutwerte der Wanderungsgeschwindigkeiten erhält man aus diesen Verhältniszahlen, sobald ein absoluter Wert für eine einzige Jonenart festgestellt ist. Diese Feststellung muß bei bestimmtem elektrischem Feld im Elektrolyten erfolgen; denn es müssen nach Ohms Gesetz die Wanderungsgeschwindigkeiten stets proportional dem Felde sein (156). Man kann Absolutwerte leicht aus Widerstandsmessungen an Elektrolyten bekannter Konzentration berechnen, worauf wir alsbald eingehen (197). Man kann außerdem an gefärbten Jonen (185) die Wanderung unmittelbar sehen, wenn ein Elektrolyt mit solchen Jonen (z. B. $KMnO_4$) an einen anderen, darüber geschichteten, ganz ungefärbten (z. B. KNO_3) grenzt; es verschiebt sich dann bei Stromdurchgang die Grenze der Färbung in der Richtung und mit der Geschwindigkeit der Wanderung des gefärbten Jons.

Die Wanderungsgeschwindigkeiten zeigen sich unter gewöhnlichen Umständen als sehr gering, noch unter Schneckengeschwindigkeit. Selbst beim schnellstwandernden H-Jon ist die Geschwindigkeit nur etwa $^1/_3$ mm/sek beim verhältnismäßig starken Spannungsgefälle von 100 Volt/cm in einem wässerigen Elektrolyten.

197. Leitvermögen der Elektrolyte. — Daß trotz der geringen Wanderungsgeschwindigkeiten starke Ströme mit entsprechenden Abscheidungen in Elektrolyten wie wässeriger Schwefelsäure auftreten können, wenn dieselben nicht zu sehr verdünnt sind, dies erklärt sich durch die sehr große, in der Volumeinheit vorhandene Zahl der so langsam bewegten Jonen. Es seien Z dissoziierte Moleküle im cm^3 vorhanden, was Z positive und Z negative — einwertig gedachte — Jonen bedeutet, jedes davon mit dem Elementarquant e geladen. Die wanderungsfähige Ladung im cm^3 ist dann eZ vom einen und ebensoviel vom anderen Zeichen. Die Wanderungsgeschwindigkeit der Kationen im Felde 1 Volt/cm sei u, die der Anionen v; im Spannungsgefälle E sind diese Geschwindigkeiten E mal so groß (161). Es bewegt sich dann in der Sekunde durch je 1 cm^2 des senkrecht zur Feldrichtung stehenden Querschnitts des (etwa in einer Röhre mit den Elektroden an den Enden befindlichen) Elektrolyten infolge der Wanderung der Kationen die Elektrizitätsmenge eZEu und infolge der entgegengesetzt gerichteten Wanderung der Anionen die Menge eZEv. Im ganzen ist daher die Stromstärke (151) durch das cm^2 (auch „Stromdichte" zu nennen) $J = eZE(u+v)$. Betrachtet man von diesem, durch 1 cm^2 gehenden Strom ein Stück von der Länge 1 cm, also ein würfelförmiges Leiterstück von 1 cm^3, und wendet man Ohms Gesetz auf dasselbe an, so ist $J = E/W$, wo W der Widerstand dieses Leiterstückes ist. 1/W, das Leitvermögen, ist danach

$$L = J/E = eZ(u+v). \qquad 197)$$

Bei genügend verdünnten Lösungen, die vollständig dissoziiert sind (185), ist die Jonenkonzentration Z gleich der Zahl der gelösten Moleküle im cm^3; über konzentrierte Lösungen s. 200.

Man kann den Widerstand von Elektrolyten bekannter Ionenkonzentration Z gut messen und dann je nach der Form des Gefäßes (das etwa eine Röhre von bekannter Länge und bekanntem Querschnitt sein kann) auf 1 cm Länge und 1 cm^2 Querschnitt umrechnen, somit W in Ohm, L in 1/Ohm ermitteln, und da eZ nach der gewogenen Menge des gelösten Stoffes, dem Molekulargewicht und dem Elementarquant e (Tab. 45) in Coulomb/cm^3 bekannt ist, kann u+v in (cm/sek)/(Volt/cm) berechnet werden[1]). Die Hinzunahme der anderweitig ermittelten Verhältniszahlen u/v (196, Tab. 46) ergibt dann auch u und v einzeln in diesem absoluten Maß. Dies ist die vorher schon erwähnte Ermittelungsweise der absoluten Wanderungsgeschwindigkeiten der Ionen (196).

Will man den hier auf 1 cm Länge und 1 cm^2 Querschnitt bezogenen, in Ohm gemessenen spezifischen Widerstand und sein Reziprokes, das Leitvermögen, auf die in Tab. 44 benutzte Quecksilbereinheit umrechnen, so kann dies leicht mit Hilfe der Quecksilberangabe für das Ohm geschehen (159). Tab. 44 (157) enthält in dieser Weise auf Quecksilber bezogene Angaben für zwei bestleitende Elektrolyten; man sieht, wie sehr ihre Leitfähigkeiten hinter der der Metalle und selbst der Kohle zurückbleiben.

198. Beschaffenheit der Ionen. — Aus den absoluten Wanderungsgeschwindigkeiten können die Durchmesser der Ionen berechnet werden. Es stehen dazu die hydrodynamischen und die gastheoretischen Gleichungen zur Verfügung (M 419, 411, W 109). Am besten durchführbar ist die Rechnung für genügend verdünnte wässerige Lösungen als Elektrolyten; man kann da so gut wie reines Wasser als Umgebung der Ionen annehmen. Einige Unsicherheit entsteht nur dadurch, daß — wie die Berechnungsergebnisse auf beiden Wegen zeigen — die Ionen meist etwas zu klein sind für die hydrodynamische Berechnung, während die gastheoretische Rechnung, in deren Gültigkeitsbereich die Ionengrößen fallen, für Flüssigkeiten vielleicht etwas unsicher wird. Da jedoch beide Rechnungen guten Anschluß aneinander geben (W 110), sind die berechneten Durchmesser in runden Zahlen genügend gesichert. Spalte 2 in Tab. 47 zeigt die Durchmesser für einige Ionen.

Es fällt auf, daß diese Durchmesser bei manchen Ionen sehr viel größer sind als die Durchmesser der betreffenden Atome (vgl. M 24, Tab. 1). Beispielsweise ist der Durchmesser des Li-Atoms, nach dem Raume, den es im festen Metall einnimmt (mit Abzug eines sehr kleinen Spielraumes für seine Wärmebewegung) nur $2{\cdot}8 \cdot 10^{-8}$ cm, während der Durchmesser des Li-Ions fast 4mal so groß ist; beim Na-Ion ist er über doppelt so groß als der des Atoms. Der Durchmesser des Cl-Ions ist sogar größer als der des $CHCl_3$-Moleküls (gefunden aus der inneren Reibung, s. W 106). Dies läßt annehmen, daß die Ionen nicht aus den betreffenden Atomen allein bestehen, sondern daß sie Anlagerungen enthalten, für welche in den sehr verdünnten wässerigen Lösungen nur Moleküle des Wassers in Betracht kommen. Diese Anlagerungen ließen sich auch ziemlich unmittelbar durch das von den Ionen zu den Elektroden hin mitgeführte und dort angehäufte Wasser nachweisen. Quantitative Beobachtungen dieser Art ergaben mit Zuziehung der Wanderungsgeschwindigkeiten die in der letzten Spalte der Tab. 47 verzeichneten durchschnittlichen Wassermolekülzahlen der verschiedenen Ionen. Man sieht, daß beispielsweise der große Durchmesser und die entsprechend langsame Wanderung (Tab. 46) des Li-Ions von seinen durchschnittlich angelagerten 19 H_2O-Molekülen kommt; das kleine und entsprechend

[1]) Die Genauigkeit der Berechnung ist nicht begrenzt durch die Genauigkeit der Kenntnis der absoluten Atomgewichte: man kann hier ebensogut das Gewicht des Wasserstoffatoms = 1 gr setzen, wobei e ebensoviel mal größer wird als Z kleiner, so daß das Ergebnis unberührt bleibt.

schnelle H-Jon hat durchschnittlich nur 1·4 (d. i. 1 bis 2) H_2O-Moleküle angelagert.

Tab. 47. Ungefähre Durchmesser und Zahlen der durchschnittlich angelagerten Wassermoleküle von Jonen.

Jon	Durchmesser		H_2O-Mol.-Zahl
H	$1{\cdot}8 \cdot 10^{-8}\,\text{cm}$ =	$0{\cdot}18\ \mu\mu$	1·4
HO	2·8	0·28	2·5
Li	10	1·0	19
Na	8·4	0·84	12
Cl	6·4	0·64	6

Diese Wasseranlagerungen sind als durchschnittlich zu bezeichnen, weil sie bei jedem Jon dauerndem Wechsel unterworfen sind durch Abspaltungen und Wiederanlagerungen, wohl infolge der Wärmebewegung. Dementsprechend sind auch die Durchmesser und die Wanderungsgeschwindigkeiten der Jonen nur als durchschnittlich und als wechselnd anzusehen. Man beobachtet die wechselnden Wanderungsgeschwindigkeiten unmittelbar an gefärbten Jonen. Die Grenze eines Elektrolyten mit gefärbtem Jon gegen die ungefärbte Flüssigkeit zeigt nicht nur die Wanderung, wie angegeben (196), sondern sie wird dabei auch schnell verwaschen, viel schneller als ohne Stromdurchgang durch Diffusion allein; es wandert ein Teil der Jonen den anderen voraus. Wendet man den Strom, so wandert zwar die Grenze wieder zurück; sie wird aber nicht etwa wieder schärfer, sondern immer nur noch verwaschener, was zeigt, daß die vorher schneller gewanderten Jonen dies jetzt nicht wieder tun, daß also die Wanderungsgeschwindigkeit jedes einzelnen Jons wechselnd ist.

199. Lösungsmoleküle; Bildungsweise der Jonen. — Anlagerungen von Lösungsmittelmolekülen finden sich nicht nur bei den Jonen (198), sondern im allgemeinen in Lösungen überhaupt, auch wenn dieselben nicht dissoziiert sind; Lösungsmoleküle sind meist komplexe Moleküle, bestehend aus dem Molekül des gelösten Stoffes und angelagerten Lösungsmittelmolekülen. Ein Zeichen solcher Zusammenlagerung ist die bei Lösungsvorgängen fast immer zu beobachtende Volumverminderung. Der Lösungsvorgang beruht überhaupt immer auf besonderen Kräften zwischen den Molekülen des festen Körpers und denen des Lösungsmittels, und er besteht in der Zusammenlagerung der ersteren Moleküle mit den letzteren unter Trennung des Zusammenhanges der ersteren untereinander. Die entsprechend großen Durchmesser der so entstehenden komplexen Lösungsmoleküle zeigen sich bei der Osmose (M 368), wo sie die „halbdurchlässigen" Wände nicht durchsetzen können. Die großen Molekularkräfte der komplexen Lösungsmoleküle, mit welchen sie an der Flüssigkeitsoberfläche ins Innere gezogen werden (M 317), zeigen sich in den vergrößerten Oberflächenspannungen von Lösungen mit komplexen Molekülen im Vergleich zum Lösungsmittel und in der Nichtabdampfung dieser Moleküle (W 223).

In alledem sind die wässerigen Elektrolyten den übrigen Lösungen mit komplexen Molekülen gleich: sie geben osmotischen Druck, haben vergrößerte Oberflächenspannung und die Jonen dampfen nicht ab.

Es sind nur die großen Molekularkräfte als Ursache des Nichtwegdampfens der Jonen aus den wässerigen Elektrolyten bekannt; die elektrischen Ladungen der Jonen könnten ihr Entweichen aus der Flüssigkeitsoberfläche nicht verhindern. Dies zeigt sich dadurch, daß es Elektrolyte gibt, aus welchen Entweichen von Jonen tatsächlich stattfindet. Es sind dies geschmolzene Salze, und zwar sind es meist die Kationen, welche aus deren Oberfläche entweichen. Es ist dann anzunehmen, daß diese Jonen keine Anlagerungen haben, und dies stimmt auch mit den besonderen Lichtemissionen überein, die diese Salze im glühendflüssigen Zustande zeigen. Die Anlagerungen der nichtabdampfenden Jonen der geschmolzenen Salze bestehen wohl aus nichtdissoziierten Salzmolekülen, die hier die Rolle der Wassermoleküle der wässerigen Elektrolyte übernehmen.

Wassermolekülen sind die Kräfte zu Anlagerungen in besonderem Maße eigen. Dies zeigt sich schon an der Zusammenlagerung („Polymerisation") der H_2O-Moleküle miteinander zu H_4O_2 im flüssigen Wasser (W 23), und die große Oberflächenspannung des Wassers, sowie sein großer innerer Druck (vgl. M 341) sind auch Äußerungen der großen Molekularkräfte. Eben diese Kräfte machen das Wasser zu einem hervorragenden Lösungsmittel für viele feste Stoffe; die Wassermoleküle umlagern leicht die Moleküle des festen Stoffes, wodurch diese voneinander getrennt werden, und die elektrolytische Dissoziation ist wohl nur ein Weitergehen desselben Anlagerungsvorganges, unter Zertrennung der Moleküle in ihre wasserumlagerten Ionen. Die Wasserumlagerung verhindert dann auch die Vereinigung zusammentreffender Ionen trotz deren entgegengesetzter Ladungen. Es erscheinen somit die großen Molekularkräfte des Wassers als die Ursache der elektrolytischen Dissoziation und damit auch der meist guten elektrischen Leitfähigkeit wässeriger Lösungen.

Beteiligt am Zustandekommen der Anlagerungen an die Ionen sind aber wohl auch deren schon in den Molekülen vorhandene elektrische Ladungen (181, 183); denn Elektrizitätsträger nehmen ganz allgemein leicht Anlagerungen auf (514).

200. Abhängigkeiten des Leitvermögens der Elektrolyte; Dissoziationsgrad. — Nach der Gleichung 197 für das Leitvermögen der Elektrolyte ist dasselbe proportional der Zahl Z der einwertigen Ionen einerlei Zeichens in der Volumeinheit (mehrwertige Ionen zählen entsprechend mehrfach) und der Summe $u+v$ der Wanderungsfähigkeiten der Ionen; das Elementarquant e ist als stets gleicher Proportionalitätsfaktor für das Folgende unwesentlich.

Man sieht daraus, daß das Leitvermögen mit zunehmender Ionenkonzentration Z steigen muß und daß verschiedene Elektrolyte bei gleicher Ionenkonzentration um so besser leiten werden, je schneller wandernde Ionen sie enthalten. Säuren mit dem schnellwandernden H-Ion (vgl. Tab. 46) leiten daher im allgemeinen sehr gut, Essigsäure mit dem langsamen $C_2H_3O_2$-Ion weniger gut, Li-Salze schlechter als K-Salze.

Die maßgebende Ionenkonzentration Z ist gleich der Zahl der in der Volumeinheit gelösten Moleküle, wenn diese alle dissoziiert sind. Letzteres haben wir im Vorhergehenden stets vorausgesetzt, und zwar zutreffenderweise, weil die herangezogene Erfahrung in allem Wesentlichen sehr verdünnte Lösungen betraf, bei welchen die für vollständige Dissoziation maßgebenden Nachweise (185) zutreffen. Es steigt dementsprechend bei diesen Lösungen die Leitfähigkeit auch genau proportional der Zahl der gelösten Moleküle. Bei konzentrierteren Lösungen zeigt sich, daß die Leitfähigkeit hinter dieser Proportionalität zurückbleibt. Dies kann zwei Gründe haben. Es können die Wanderungsgeschwindigkeiten $u+v$ in den konzentrierteren Lösungen kleiner sein als in den verdünnten, die nahezu wie reines Wasser sich verhalten; es kann aber auch die Dissoziation unvollständig und also die Zahl der Ionen kleiner sein. Im allgemeinen wirken beide Gründe zusammen.

Daß die Dissoziation bei zu großer Konzentration unvollständig werden kann, dies folgt schon aus dem Mangel des für die Dissoziation wesentlichen Wassers (199) in konzentrierten Lösungen. Man kann überhaupt die „Sättigung" von Lösungen darauf zurückführen, daß alles Lösungsmittel in Anlagerungen an die schon gelösten Moleküle festgelegt ist und keine freien Lösungsmittelmoleküle mehr zu weiterer Lösung, d. i. Anlagerung, verfügbar sind. Insofern für die Dissoziation, d. i. gesonderte Anlagerung an die Ionen, noch mehr Lösungsmittel erforderlich sein kann, als für die Lösung ohne Dissoziation, ist es verständlich, daß die Dissoziation unvollständig werden kann schon ehe Sättigung eintritt. So leitet z. B. eine wässerige Lösung von 25 Gewichtshunderteln $ZnSO_4$ besser als weniger konzentrierte, aber auch besser als noch konzentriertere Lösungen (vgl. Tab. 44), wohl weil bei den konzentrierteren Lösungen die Dissoziation sehr unvollständig ist.

Um auch unvollständige Dissoziation mit zu umfassen, führt man den Dissoziationsgrad Δ ein, welcher den Bruchteil der dissoziierten Moleküle in der Lösung angibt, so daß für die Zahl Z der Ionen eines Zeichens gilt $Z = Z_0\Delta$, wenn Z_0 die Zahl der gelösten Moleküle in der Volumeinheit ist. Es ist stets $0 < \Delta < 1$. Das Leitvermögen ist dann proportional

$$Z_0 \cdot \Delta \cdot (u + v),$$

hängt also ab von den 3 Faktoren: Konzentration Z_0, Dissoziationsgrad Δ und Wanderungsgeschwindigkeiten (u+v). Bei höchst verdünnten Lösungen ist zwar $\Delta = 1$, aber Z_0 sehr klein, daher das Leitvermögen gering; bei steigender Konzentration wächst es zunächst proportional Z_0, dann aber wegen des Sinkens von $\Delta(u+v)$ verzögert; zuletzt kann es sogar gegen Null gehen, wenn $\Delta = 0$ wird. Letzterer Fall tritt z. B. bei Schwefelsäure ein. Das Leitvermögen wässeriger Schwefelsäure steigt bis zur Konzentration von 30 Gewichtshunderteln (vgl. Tab. 44); von da ab sinkt es wieder, und die reine Schwefelsäure leitet ebenso schlecht wie das reine Wasser, weil sie ebensowenig dissoziiert ist wie dieses.

Leicht ermittelbar sind durch Leitvermögensmessungen bei bekanntem Z_0 stets die Veränderungen des Produktes Δ (u+v); schwerer entscheidbar sind aber die Beiträge seiner einzelnen Faktoren, Δ und (u+v)[1]. Hierbei kommt auch in Betracht, daß in sehr ionenreichen Flüssigkeiten eine Verringerung der Wanderungsgeschwindigkeiten u und v infolge einer gegenseitigen Beeinflussung der Ionen eintreten kann. Es ist nämlich zu denken, daß jedes Ion eines Zeichens auf seinem Wanderungswege Ionen des entgegengesetzten Zeichens herbeizieht, wodurch es dieselben hinter sich stets in größerer Dichte hat als vor sich, und wodurch es also mehr zurück als vorangezogen wird; in gleichem Sinne geht auch die Einwirkung der Ionen des gleichen Zeichens. Es ist dies ein verringernder Einfluß auf die Wanderungsgeschwindigkeiten, welcher weder in den hydrodynamischen noch in den gaskinetischen Gleichungen (vgl. 198) enthalten ist und daher die Überlegungen für konzentrierte Lösungen erschwert.

Mit steigender Temperatur nimmt das Leitvermögen aller Elektrolyte zu; sie verhalten sich damit entgegengesetzt den Metallen (169). Eine Änderung des Dissoziationsgrades ist dabei im allgemeinen nicht anzunehmen, da bei den meisten verdünnten Lösungen auch in tiefer Temperatur schon $\Delta = 1$ ist, sondern es steigen die Wanderungsgeschwindigkeiten mit steigender Temperatur. Dies hat zwei Gründe. Erstens fände solches Steigen auch bei unverändertem Durchmesser der Ionen nach den Wanderungsgeschwindigkeitsgleichungen (198) infolge der Änderungen im Wasser statt und zweitens werden die Ionen infolge Abnahme ihrer Wasseranlagerungen kleiner. Letzteres zeigt sich daran, daß das Leitvermögen bei Temperaturerhöhung am meisten bei denjenigen Elektrolyten steigt, die Ionen mit großen Wasseranlagerungszahlen haben (z. B. Li, vgl. Tab. 47); auch ist es allgemeine Eigenschaft komplexer Moleküle, bei hoher Temperatur zu zerfallen.

201. Der Elektrizitäts-Austausch an den Elektroden; Zersetzungsspannung; thermische und elektrolytische Dissoziation. — Wir haben bisher die Elektrizitätsbewegung innerhalb des stromführenden Elektrolyten betrachtet; es bleibt noch übrig zu untersuchen, wie der Ein- und Austritt des Stromes an den Elektroden erfolgt.

Die Folge der Ionenwanderungen im Elektrolyten ist Anhäufung der Ionen an den Elektroden, wie es für das Beispiel der Elektrolyse von HCl Abb. 107 darstellt (vgl. 196). Die fertigen Abscheidungen an den Elektroden — entweichende Gase, wachsende Metallüberzüge — sind aber elektrisch neutral; es muß also Entladung der Ionen an den Elektroden stattfinden, und zwar müssen die Ionen ihre Ladungen an die Elektroden abgeben, weil der Strom in diesen seine Fortsetzung finden muß. Erst mit Entladung der Ionen erfolgt auch der Verlust ihrer Wasseranlagerung und die etwaige Gruppierung zu den Molekülen des abgeschiedenen Stoffes, z. B. H_2 und Cl_2 im Beispiel der Abb. 107.

---

[1]) In älterer Literatur findet man oft das Produkt $\Delta \cdot (u+v)$ „Dissoziationsgrad" genannt, was aber unzweckmäßig ist.

Diese Entladung der Ionen an den Elektroden findet bei Anionen und Kationen in verschiedener Weise statt, weil nur negative Elektrizität von einem Atom ins andere übergehen kann (vgl. 12). Die Anionen müssen ihre Valenzelektronen (182) an die Anode abgeben; die Kationen müssen die ihnen fehlenden Valenzelektronen aus der Kathode aufnehmen.

Diese Elektronen-Abgaben bzw. -Aufnahmen gehen nicht ohne Wirkung bestimmter elektrischer Kräfte vor sich, die an den Elektrodenoberflächen vorhanden sein müssen. Die Richtung dieser Kräfte stimmt überein mit der der angeschalteten Kraft der Stromquelle, welche auch die Ionenwanderung hervorbringt; denn es handelt sich um Fortsetzung eines und desselben elektrolysierenden Stromes an den Elektroden. Die Größe der nötigen Kraft an jeder der Elektroden ist abhängig von der Natur des zur Abscheidung kommenden Ions. Je elektropositiver das Kation ist, desto mehr Kraft ist nötig, um ihm die verlorene negative Elektrizität wieder beizubringen, und je elektronegativer das Anion ist, desto mehr Kraft ist nötig, um ihm die aufgenommene negative Elektrizität wieder zu entziehen. Man sieht, daß diese Kräfte von der Stellung der betreffenden Elemente in Voltas Spannungsreihe abhängen (136, 183). Mitbestimmend ist auch die Natur der Elektrodenplatten, weil deren Atome die Elektronen abgeben bzw. aufnehmen müssen; es werden aber gewöhnlich weder stark elektropositive noch elektronegative Stoffe als Elektroden benutzt, sondern Platin, Kohle oder andere möglichst unangreifbare Leiter, die nicht viel Kräfte für die Abgabe oder Aufnahme erfordern, und es genügt auch zur Erläuterung der Hauptsache die Betrachtung der für die Ionen nötigen Kräfte.

Die Summe der an den beiden Elektroden nötigen Kräfte muß von der Stromquelle geliefert werden, um die Elektrolyse dauernd zu unterhalten, d. h. um dauernd die an die Elektroden gewanderten Ionen zu entladen und also den Strom dauernd im Kreise fließen zu lassen. Maßgebend für die Größen der an den Elektrodenoberflächen verfügbaren, auf die Elementarquanten wirkenden Kräfte ist die an die Elektroden angelegte Spannung. Man kann z. B. mit einer Stromquelle, die nur 1 Volt Spannung gibt, weder Schwefelsäure (Wasser) noch Salzsäure elektrolysieren; der Strom kommt alsbald zum Stillstand, weil die angehäuften Ionen nicht entladen werden können, was den in der Abb. 107b oder c dargestellten, im folgenden noch näher zu untersuchenden Zustand ergibt.

In dieser Weise hat jeder Elektrolyt seine besondere „Zersetzungsspannung“, die zumindest an den Elektroden vorhanden sein muß, wenn dauernde Elektrolyse stattfinden soll. Verdünnte Schwefelsäure hat die Zersetzungsspannung von 2·0 Volt, welches also die zu gewöhnlicher Wasserelektrolyse zumindest nötige Spannung ist. Besonders groß wird die Zersetzungsspannung sein, wenn beide Ionen nahe dem Ende von Voltas Spannungsreihe stehen. So z. B. bei NaCl. NaJ hat eine wesentlich kleinere Zersetzungsspannung, weil das J-Ion sein Elementarquant weniger festhält als das Cl-Ion. Wir kommen hierbei auf die frühere Feststellung zurück, daß chemische Kräfte elektrische Kräfte sind (181 u. f.).

Man bemerkt, daß erst die mit der Entladung der Ionen stattfindende Abscheidung der Bestandteile in elektrisch neutralem Zustand die vollständige

Zersetzung der elektrolysierten Verbindung bedeutet; die elektrolytische Dissoziation in die Jonen ist nur eine Vorstufe dazu. Die Unterschiede in den Kräften des Zusammenhalts verschiedener Molekülarten, in den „chemischen Kräften", kommen nicht bei der elektrolytischen Dissoziation, sondern bei der Jonenentladung zum Vorschein; sie zeigen sich in den Zersetzungsspannungen, die man als ein Maß der chemischen Kräfte ansehen kann. Es hält z. B. das Molekül NaCl viel fester zusammen als NaJ; ersteres zerfällt nur bei Weißglut, letzteres schon bei Rotglut, und dem entspricht die Verschiedenheit der Zersetzungsspannungen. Zersetzung unter Aufwand von Wärmeenergie, die „thermische Dissoziation" (W 124), ist vollständige Zersetzung in die elektrisch neutralen Atome ohne Zwischenstufe; sie erfolgt in dem früher benutzten Molekülbild (182) nach der punktierten Umrahmung, Trennung bei t t ergebend. Die elektrolytische Dissoziation (184), in diesem Bild durch den Vertikalstrich e e angedeutet, gibt nicht die volle Sonderung, die jedem Atom alles zuteilt, was zu ihm gehört.

Will man den Aufwand von elektrischer Energie berechnen, der zur Zersetzung einer gegebenen Menge einer Verbindung erforderlich ist, so hat man das Produkt von Spannung und Elektrizitätsmenge zu bilden (119). Die Spannung ist durch die Zersetzungsspannung gegeben, und die Elektrizitätsmenge durch Stromstärke und Zeit. Man sieht, da die Elektrizitätsmenge nach den Gesetzen der Elektrolyse (174, 188) mit den abgeschiedenen Stoffmengen zusammenhängt, daß die Zersetzungsspannungen das Maß für die zur Zersetzung äquivalenter Mengen verschiedener Stoffe erforderlichen Energien bilden.

202. Elektrolytische Polarisation. — Wenn an die Elektroden einer Zersetzungszelle eine unter der Zersetzungsspannung des Elektrolyten liegende Spannung geschaltet ist, so entsteht der bereits erwähnte, in Abb. 107 b und c skizzierte Zustand. Die Elektroden sind mit den hingewanderten Jonen bedeckt, aber Entladung derselben findet nicht statt (201). Man nennt dies den Zustand „elektrolytischer Polarisation".

Wir werden, um diese Polarisation und Verwandtes hier zu untersuchen, stets voraussetzen, daß sekundäre Wirkungen an den Elektroden (177), die immer eine gesonderte Betrachtung erfordern, nicht stattfinden. In der Abb. 108 ist beispielsweise Salzsäurelösung zwischen Kohleelektroden gedacht, die für Wasserstoff und Chlor unangreifbar sind. Die Anode ist mit Cl-Jonen, die Kathode mit H-Jonen bedeckt. Die den Ladungen der Jonen zugehörigen Kraftlinien haben sich unter Wanderung der Jonen soweit wie möglich verkürzt; es reicht jede Kraftlinie vom betreffenden Jon bis zur benachbarten Elektrodenplatte, wo die entgegengesetzt gleiche Elektrizitätsmenge angehäuft ist. Die Elektroden haben somit elektrische Doppelschichten (vgl. 133) an sich, während das Volum des Elektrolyten feldfrei ist, weshalb auch keine Jonenwanderung mehr stattfindet. So kommt der in Abb. 108 schematisch dargestellte Zustand der elektrolytischen Polarisation zustande, der dann weiter unverändert bestehen bleibt, so lange

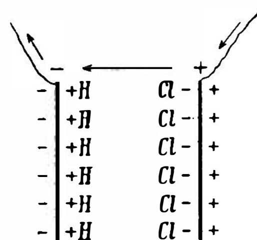


Abb. 108. Elektrolytische Polarisation.

die an die Elektrode geschaltete Spannung unterhalb der Zersetzungsspannung bleibt.

Bei allmählicher Vermehrung der angeschalteten Spannung kommen neue Kraftlinien an den Zuleitungsdrähten entlang in den Elektrolyten und lassen erneut Jonen wandern[1]), die dann ihre Kraftlinien in die Doppelschichten bringen, deren Kräfte verstärkend, so daß schließlich bei Erreichung der Zersetzungsspannung Jonenentladung und damit fortlaufende Elektrolyse stattfindet.

Bei ungenügender Spannung der Stromquelle bleibt der stromlose Polarisationszustand bestehen[2]); die Elektrizitätsmengen an den Elektroden sind so weit angewachsen, daß die Spannung der beiden Doppelschichten zusammen genau *entgegengesetzt gleich* geworden ist *der angeschalteten Spannung*, wodurch eben das Feld im Elektrolyten vernichtet und die Jonenwanderung stillgelegt ist. Die angeschaltete Spannung würde, für sich allein vorhanden, Strom in der Pfeilrichtung der Abb. 108 durch den Elektrolyten treiben (und hat dies auch getan, wodurch eben der Polarisationszustand entstanden ist); die Spannung der Doppelschichten würde, für sich allein, *entgegengesetzten Strom* hervorbringen. Letzteres kann verwirklicht werden, wenn man die angeschaltete Spannungsquelle entfernt und die beiden Elektroden einfach durch einen Draht miteinander verbindet, „kurzschließt". Es fließt dann überall Strom entgegen den Pfeilen der Abb. 108, wobei die H- und die Cl-Jonen der beiden Doppelschichten im Elektrolyten wieder zusammenwandern und gleichzeitig die an den Elektrodenplatten sitzenden Ladungen der Doppelschichten durch den Draht sich vereinigen, womit dieser Rückstrom — auch „*Polarisationsstrom*" genannt — sein Ende findet.

Man kann sowohl den kurzdauernden Strom — „Stromstoß" — bei Anschaltung der Spannung, als auch den entgegengesetzt gerichteten Stromstoß bei Kurzschluß der Zersetzungszelle sichtbar machen, wenn ein Galvanometer in die Leitung geschaltet ist; man erhält in den beiden Fällen gleichgroße, aber entgegengesetzt gerichtete kurzdauernde Ausschläge. Die Zersetzungszelle verhält sich somit unterhalb der Zersetzungsspannung wie eine Kleistsche Flasche, deren Kapazität von der Größe der Elektrodenoberflächen abhängt.

Aus der Größe der Galvanometerausschläge kann die bei Herstellung bzw. Entladung der Polarisationsdoppelschichten in Bewegung kommende Elektrizitätsmenge und damit auch die Anzahl der Jonen entnommen werden, die in solchen Doppelschichten sich finden. Es zeigt sich, daß die Jonenbelegungen immer nur die Dicke weniger Molekülschichten haben; die Ladungsverteilung in ihnen muß nach dem Inneren der Flüssigkeit hin wegen der Wärmebewegung verwaschen begrenzt sein (vgl. 45). Die Schichten bleiben immer unsichtbar dünn; sichtbar werdende Gasbläschen bestehen stets aus bereits entladenen Jonen, die zu unelektrischen Molekülen sich vereinigt haben.

[1]) Die Umformungen der Kraftlinien bei solchen Vorgängen haben wir bereits betrachtet (85).

[2]) Ein sehr schwacher Dauerstrom kann auch bei Spannungen unterhalb der Zersetzungsspannung beobachtet werden. Es ist möglich, daß die Wärmebewegung in den Doppelschichten zeitweilig örtlich vergrößerte Felder und damit gelegentliche kleine Jonenentladungen hervorbringt.

Oberhalb der Zersetzungsspannung, wenn fortlaufende Elektrolyse stattfindet, besitzt die Zersetzungszelle ebenfalls stets eine der angelegten Spannung entgegengerichtete Spannung. Ursache dieser Gegenspannung, auch Polarisationsspannung genannt, sind in diesem Falle nicht nur die stets vorhandenen — wenn auch fortlaufend entladenen und wieder erneuerten — Doppelschichten, sondern auch die durch die Elektrolyse geschaffene veränderte Verteilung der Stoffe in der Zelle. Wird beispielsweise eine Zinkvitriollösung zwischen Platinplatten oder zwischen Kupferplatten elektrolysiert, so überzieht sich die Kathodenplatte mit Zink und es stehen dann nicht mehr zwei gleiche Platten in gleicher Flüssigkeit einander gegenüber — was keine Spannung lieferte —, sondern es ist ein Voltasches Element aus der Zelle geworden: es stehen jetzt Zink und Kupfer in Salzlösung einander gegenüber. Daß die eigene Spannung dieses durch Elektrolyse entstandenen Elements der angelegten, elektrolysierenden Spannung entgegengerichtet sein muß, ergibt sich ganz allgemein daraus, daß Elektrolyse stets elektropositive Stoffe, nämlich die Kationen, nach der negativen Platte und elektronegative, nämlich die Anionen, nach der positiven Platte schafft, was in der Richtung von Feldumkehr in der Zelle geht.

Selbst auch die schon betrachteten Konzentrationsänderungen im Elektrolyten, infolge der Ionenwanderungen (196), wirken in diesem Sinne mit; es treten an jeder Grenz- oder Übergangsfläche zwischen verschieden konzentrierten oder gar stofflich verschiedenen Elektrolyten Spannungen auf infolge der verschieden schnellen Diffusionsbewegung der Ionen beiderlei Zeichens, falls dieselben ungleiche Durchmesser haben, was näher zu betrachten nicht nötig ist, weil es grundsätzlich Neues nicht bedeutet.

Außerdem kann die Notwendigkeit des Auftretens von Gegenspannung bei Elektrolyse auch aus dem Energiegesetz eingesehen werden, da mit den abgeschiedenen Stoffen chemische Energie gewonnen wird, worauf wir später zurückkommen (216).

Ist eine Zersetzungszelle so eingerichtet, daß trotz Stromdurchgangs keine stofflichen Veränderungen in ihr eintreten, so kann sie auch keine Gegenspannung entwickeln; sie ist „unpolarisierbar". Dies kann mit Zuhilfenahme sekundärer Wirkungen (177) erreicht werden. Eine Zelle mit stets gleichmäßig konzentriert gehaltener Kupfersulfatlösung zwischen Kupferelektroden würde z. B., wie leicht einzusehen, die Bedingung erfüllen.

Die Gegenspannung, welche Zersetzungszellen in einem Stromkreis entwickeln, muß bei Anwendung von Ohms Gesetz zur Berechnung der Stromstärke sinngemäß berücksichtigt werden; die Zellen wirken selbst wie Stromquellen mit. Es sei in einem einfachen Stromkreis, welcher eine Stromquelle und eine elektrolytische Zelle enthalte, V die Spannung der Stromquelle, V_0 die Gegenspannung der Zelle und W der Gesamtwiderstand des Kreises, so ist die Stromstärke $J = (V - V_0)/W$. Es ist stets $V_0 \leq V$; denn es kommt bei kleinen V, wie schon erläutert, gar nicht die volle Polarisationsspannung, sondern nur eben die Spannung V in der Zelle zustande, und es würde die dann vorhandene Gesamtspannung $V - V = 0$ und damit auch der Strom Null sein.

203. Metallauflösung in wässerigen Säuren. — Wir haben als wesentlich für die Wirkung von Voltas Element bereits den Lösungsvorgang des Zinks in der wässerigen Flüssigkeit angegeben (149). Es sei jetzt dieser Vorgang an einer Zinkplatte, die in verdünnter Schwefelsäure sich befinde, näher überlegt. Die Vorstellung, daß die Auflösung des Zinks in der Umsetzung von Zn mit H_2SO_4 zu $ZnSO_4$ und H_2 bestehe, kann so nicht zutreffen; denn H_2SO_4 ist in Lösung bereits zu Ionen dissoziiert. Aber auch der Gedanke, daß Zinkatome mit den SO_4-Ionen der Schwefelsäure zu Zinksulfat sich verbänden, welches in Lösung gehe, kann nicht die Hauptsache bedeuten; denn Zinksulfatmoleküle finden sich in der Lösung gar nicht, sondern nur Zn-Ionen und die vorher schon dagewesenen SO_4-Ionen.

Vielmehr lassen die im vorhergehenden schon erläuterten Kenntnisse nicht zweifeln, daß das Zink in Ionengestalt in die Flüssigkeit übergeht. Mit positiver

Ladung kommen die Zinkatome schon im festen Metall vor (13), und zwar kann jedes Zinkatom 2 Elektronen verlieren, entsprechend seiner Zweiwertigkeit. Daß an so geladene Zinkatome Wassermoleküle sich lagern, hat die Untersuchung der Ionen gezeigt (198), und dieser Anlagerungsvorgang durch Wirkung der großen Molekularkräfte des Wassers muß es wohl sein, der die positiven Zinkatome aus der Oberfläche der Platte loslöst, wie auch sonst Lösung fester Körper in Flüssigkeiten mit Komplexbildung verbunden ist (vgl. 199).

In dieser Weise greifen wässerige Flüssigkeiten alle Metalle an, nur in verschiedenem Grade; es gehen stets positive Metallionen in die Flüssigkeit. Dadurch entsteht an der Grenze der Metalloberfläche gegen die Flüssigkeit eine elektrische Doppelschicht (133), deren positive Seite in der Flüssigkeit ist, während die negative Ladung, bestehend aus den abgetrennten (Valenz-) Elektronen der gelösten Atome, im Metall ist. Die Ladung dieser Doppelschicht ist um so stärker zu erwarten, je leichter die Metallatome Elektronen verlieren, d. i. je elektropositiver das Metall ist; denn es werden entsprechend mehr Atome an der Oberfläche im Ionenzustand sich finden, in welchem sie von Wasser gelöst werden. Man sieht, daß hier wieder die Stellung des Metalls in der Spannungsreihe (136, 183, 201) maßgebend sein muß. Kalium, Natrium lösen sich in der Tat stürmisch in wässerigen Säuren, Zink schon langsamer[1]); Gold und Platin brauchen die Anwesenheit von frisch freiwerdendem, einatomigem Chlor (Chlor „in statu nascendi"), wie im Königswasser, um in Chlorid überzugehen. Die schwer angreifbaren, „edlen" Metalle sind die wenigst elektropositiven.

Wenn Metall, z. B. Zink, in Ionengestalt in die Flüssigkeit übergegangen ist, ist diese positiv aufgeladen, während die Platte mit den in ihr zurückgebliebenen Elektronen negativen Überschuß hat; es entsteht so eine elektrische Spannung zwischen der Flüssigkeit und der Metallplatte. Die Spannung ist schon nach Übergang verhältnismäßig weniger Metallionen in die Flüssigkeit so weit gewachsen, daß sie den weiteren Übergang verhindert, wodurch die Auflösung zum Stillstand kommt. Man findet dies beispielsweise verwirklicht bei reinem Zink in verdünnter Schwefelsäure. Das Metall bleibt ruhig in der Säure; es löst sich weder auf, noch entwickelt es Wasserstoff.

204. Ionenverdrängung nach Maßgabe der Spannungsreihe. — Wenn aber diese, der elektropositiven Natur des Zinks entsprechende, positiv nach außen gerichtete Spannung an einer Stelle der Zinkoberfläche nicht vorhanden oder vermindert ist, z. B. wenn dort einige Atome eines fremden, weniger elektropositiven Stoffes, etwa Eisen- oder Kohle-Partikel als Verunreinigung sich befinden, so kann dort Entladung der positiv aufgeladenen Säure mit der Zinkplatte stattfinden. Es geht dann dort positive Elektrizität von der Flüssigkeit in die Platte, und zwar kommt sie in Gestalt der reichlich in der sauren Flüssigkeit vorhandenen H-Ionen an die Platte heran. Man sieht dann an dieser Stelle Wasserstoffgas in Gestalt von Bläschen entweichen. Dies ist der gewöhnliche Auflösungsvorgang des (gewöhnlich unreinen) Zinks in verdünnter Schwefelsäure unter Wasserstoffentwickelung. Man kann die beim reinen Zink fehlende Wasserstoffentwickelung sofort hervorrufen, wenn man

[1]) Aluminium ist nur deshalb schwer löslich, weil es sich an der Luft immer sofort mit einer schwerlöslichen Oxydhaut überzieht.

das Zink in der Flüssigkeit mit einem hineingebrachten Platindraht berührt; man sieht dann deutlich, daß die Wasserstoffentwickelung nicht am Zink, sondern am Platin stattfindet.

Diese Wasserstoffentwickelung zeigt, daß die durch die Zinkionen hervorgebrachte Spannung groß genug ist, um die Wasserstoffionen zur Entladung zu bringen. Zink zeigt sich somit elektropositiver als Wasserstoff; die Zinkionen vertreiben die Wasserstoffionen aus der Flüssigkeit. In demselben Maße, wie Wasserstoff entweicht, kann neues Zink in äquivalenter Menge weiter in Lösung gehen.

In dieser Weise zeigen sich alle Metalle, die wie Zink unter Wasserstoffentwickelung in Säure sich lösen, als elektropositiv gegen Wasserstoff, und die keinen Wasserstoff entwickelnden, wie Kupfer, als elektronegativ; Wasserstoff erhält so seinen Platz in der Spannungsreihe (Tab. 43) zwischen Eisen und Kupfer.

Ebenso können auch Metalle untereinander verglichen werden; es vertreibt stets das elektropositivere durch seine Ionen die leichter entladbaren Ionen des weniger positiven aus der Flüssigkeit; so scheidet z. B. eine Zinkplatte in Kupfervitriollösung Kupfer an ihrer Oberfläche aus, und Magnesium und Aluminium können mittels Kalium abgeschieden, „reduziert" werden. Die chemische Bedeutung der Spannungsreihe — oder, was dasselbe ist, die elektrische Natur der chemischen Kräfte (181) — wird so von neuem deutlich.

205. Wirkungsweise von Voltas Element. — Voltas Element mit Zink und Kupfer in verdünnter Schwefelsäure (142) verdankt nach dem Vorhergehenden seine Wirksamkeit den beiden Doppelschichten an den Metalloberflächen, deren positive Belegungen unter dem lösenden Einfluß des Wassers in die Flüssigkeit hinein sich fortsetzen (203). Beide Doppelschichten liefern positive Elektrizität in die Flüssigkeit; sie wirken also gegeneinander; die Wirkung des Zinks überwiegt aber, weil es elektropositiver ist (203). Der Unterschied der Spannungen der beiden Doppelschichten, welcher zur Wirkung gelangt, ist die elektromotorische Kraft des Elements, rund 1 Volt. Die beiden äußeren, in der Flüssigkeit gelegenen Belegungen der Doppelschichten sind durch die Flüssigkeit selbst leitend verbunden; verbindet man auch die inneren Belegungen, indem man die beiden Metallplatten durch einen Draht verbindet, so erfolgt die Entladung der Doppelschicht des Zinks gegen die schwächere des Kupfers; es fließt Strom in der gewohnten Richtung, vom Zink zum Kupfer innerhalb der Flüssigkeit. Der Strom dauert an, da die Doppelschichten immer wieder von neuem ihre Ladungen mit der den vorhandenen Stoffen eigenen Spannung ergänzen, solange diese Stoffe unverändert vorhanden bleiben.

Der in der Flüssigkeit fließende Strom scheidet Wasserstoff am Kupfer aus, wie in einer elektrolytischen Zelle. Gegen das Zink hin wandern die SO_4-Ionen der Schwefelsäure; diesen entgegen kommen die Zn-Ionen aus der Zinkplatte und zwar wird an der Zinkoberfläche der ganze Strom durch die Zinkionen getragen, weil negative Elektrizität in keiner Form durch diese Oberfläche geht. Es findet somit notwendigerweise ein dem vollen Strom entsprechender Zinkverbrauch statt, solange das Element Strom liefert, ebenso eine äquivalente Wasserstoffentwickelung.

Um vermeidbaren Zinkverbrauch bei geöffnetem Strom auszuschalten, amalgamiert man das Zink; es verhält sich dann wie reines Zink (204) und löst sich nicht unnötig in der Schwefelsäure, weil die flüssige Amalgamoberfläche überall genau gleiche Beschaffenheit herstellt, im besonderen Eisen, Kohle und dergl., die gewöhnlichen Verunreinigungen des Zinks, gar nicht aufnimmt, so daß keine Ansatzpunkte für Wasserstoffentwickelung vorhanden sind.

206. Chemische Energie als Ursprung der Stromenergie. — Wenn Zink in Schwefelsäure aufgelöst wird, verschwindet chemische Energie. Denn

das metallische Zink enthält reichlich chemische Energie, was daraus hervorgeht, daß es mit Sauerstoff oder mit Chlor unter starker Wärmeentwickelung verbrennen kann. Wenn es verbrannt ist, hat es die chemische Energie nicht mehr; es ist an ihrer Stelle die entwickelte Wärme da (W 126 u. f.). Ebenso enthält auch das in Säure gelöste Zink die chemische Energie nicht mehr; es tritt auch bei dieser Lösung Wärmeentwickelung ein, und außerdem wird Wasserstoff frei, der selbst noch verbrennen und weitere Wärme entwickeln kann. Letzteres ist der Grund, warum beim Lösen von Zink weniger Wärme entwickelt wird als beim Verbrennen desselben (vgl. W 127).

Da Lösung des Zinks das Wesentliche bei der Wirkung des Volta-Elements ist (149, 205), muß die elektrische Energie, die das Element vermöge seines Stromes liefert (119), der Ersatz für die beim Lösen des Zinks in dem Element verlorene chemische Energie im Sinne des Energiegesetzes sein, und dies bestätigt sich auch: Es fehlt bei Lieferung elektrischer Energie der entsprechende Betrag von Lösungswärme im Element.

Das Element erscheint so als eine Vorrichtung, welche chemische Energie, statt — wie gewöhnlich — in Wärme, in elektrische Energie verwandelt. Die elektrische Energie kann aus dem Strom, wenn man will, wieder in Gestalt von Wärme erhalten werden; man hat nur einen geeignet dünnen Draht in den Stromkreis zu schalten, um dies augenscheinlich zu machen; derselbe kommt zum Glühen.

Es liegen hier bei Voltas Element eigentümliche Wirkungen vor, die man als „Fernwirkungen" bezeichnen könnte. Löst man (unreines) Zink in einfacher Weise in verdünnter Schwefelsäure auf, so sieht man die zugehörige Wasserstoffentwickelung an der Zinkoberfläche und die Wärmeentwickelung erfolgt im Lösungsgefäß. Stellt man aber einer (reinen oder amalgamierten) Zinkplatte in der verdünnten Schwefelsäure eine Kupferplatte gegenüber und verbindet beide Platten außen durch einen Stromleiter, was ein Voltasches Element ergibt, so löst sich ebenfalls das Zink auf, der Wasserstoff entwickelt sich aber jetzt anderswo, nämlich am Kupfer — eine „chemische Fernwirkung" —, und die Lösungswärme kann man ebenfalls an beliebig ferner Stelle sich entwickeln lassen, wenn man entsprechend lange und dicke Stromleiter nimmt und deren ferne Enden durch den geeignet dünnen Glühdraht verbindet, — eine „Wärme-Fernwirkung".

Die chemische Fernwirkung ist indessen einfach Elektrolyse der Schwefelsäure durch den eigenen Strom des Elements. In derselben Weise entsteht aber auch, wie wir sahen (204), der bei einfacher Zinkauflösung am Zink entweichende Wasserstoff. Er entwickelt sich in Wirklichkeit nicht am Zink, sondern ebenfalls an anderen Stoffen; nur daß diese nicht abgesondert vom Zink und außen leitend mit demselben verbunden in der Säure sind, sondern in kleinen Partikeln am Zink selbst sitzend. Sind es etwa Kupferpartikel, so ist der gewöhnliche Lösungsvorgang ganz dasselbe wie der Vorgang im Volta-Element, nur daß der elektrische Strom, dem die Wasserstoffabscheidung zugehört, nicht durch einen äußeren Leiterkreis, sondern auf sehr kurzen Wegen fließt; seine Kreise gehen auch hier von den Lösungsstellen des Zinks aus durch die Schwefelsäure zum Kupfer (-Partikel) und von diesem sofort wieder ins Zink und zurück zur Lösungsstelle.

Ebenso ist auch die Wärmeentwickelung, ob an ferner Stelle des Leiterkreises oder nahe bei der Lösungsstelle des Zinks, ein und derselbe Vorgang, nämlich Erwärmung durch den elektrischen Strom; sie tritt in beiden Fällen nur dort auf, wo Strom fließt und ihre Verteilung richtet sich nach dem alsbald zu betrachtenden Gesetz der Stromwärme (217).

207. Berechnung der elektromotorischen Kraft des Volta-Elements durch das Energiegesetz. — Insofern also die Vorgänge in Voltas Element mit seinem Stromkreis und bei der einfachen Auflösung von Zink von gleicher Art sind und insofern im besonderen die gewöhnliche Lösungswärme des Zinks auch nur Wärmewirkung elektrischer Ströme ist, wie wir sahen, mit dem einzigen Unterschied, daß die Ströme im Element geordnete

Bahnen und einen nach außen hin fortgesetzten Weg haben, was bei der einfachen Auflösung fehlt, muß auch die folgende Rechnung zutreffen, welche die Lösungswärme in Verbindung bringt mit der elektrischen Energie des Elements und somit mit dessen elektromotorischer Kraft.

Die Wärmeentwickelung beim Auflösen von 65 gr (das Atomgewicht in Grammen) Zink in verdünnter Schwefelsäure beträgt, im Kalorimeter gemessen, 40 Kalorien oder 427 · 40 mkgr oder 427 · 40/0·102 Voltcoulomb (120). Die Zahl der Coulomb, welche das Element mit dieser Zinkmenge liefert, ist leicht angebbar; denn diese ganze Elektrizitätsmenge kommt in Gestalt von Zinkionen in Bewegung und jedes der zweiwertigen Zinkionen trägt ebenso viel Ladung wie 2 Silberionen, die einwertig sind, also 65 gr Zink ebensoviel wie 2 · 107 gr Silber, und es sitzt je 1 Coulomb an 0·001118 gr Silber (175). Die Zahl der Coulomb ist daher 2 · 107/0·001118. Der Quotient aus der Zahl der Voltcoulomb und der der Coulomb muß die Spannung am Element in Volt geben, und dieser Quotient ist 0·9 Volt. Von etwa dieser Größe ist in der Tat die elektromotorische Kraft des einfachen Volta-Elements.

Man sieht hier wieder das Energiegesetz bei Schlüssen über Einzelheiten hinweg sich bewähren und es zeigt sich auch die benutzte einfache Auffassung des Vorganges mindestens in der Hauptsache bestätigt.

208. Chemische Energie betrachtet als elektrische Energie. — Wir sahen die als Lösungswärme meßbare chemische Energie des Zinks als Ursprung der elektrischen Energie des Volta-Elements (206, 207). Die vorher entwickelte Kenntnis der Vorgänge im Element zeigt aber, daß die im Zinkatom vorhandene „chemische Energie“ von vornherein schon elektrische Energie ist, nämlich elektrische Energie der Kraftfelder der Valenzelektronen des Zinkatoms (203 u. f.), und daß die „Verwandlung“ dieser „chemischen“ Energie in „elektrische“ Energie nur eine Herausholung der Kraftfelder dieser Valenzelektronen aus den Atomen ist (vgl. 127), mit dem Ergebnis der Abtrennung der Elektronen und daher der freien Verfügbarkeit der Kraftfelder im elektrischen Strom.

Es ist hier ein Beispiel der Einheitlichkeit der verschiedenen Energieformen zu sehen, deren Unterscheidung überhaupt nur aus der Beschränktheit der Sinnesorgane des Menschen entsprungen ist; die Unterscheidung ist wegen dieser Beschränktheit auch durchaus notwendig, um das Übersehen versteckter Energiemengen zu verhindern, damit bei Rechnungen nach dem Energiegesetz sicher alle Energie richtig berücksichtigt werde. Nimmt man aber die Kenntnisse von den sinnlich nicht unmittelbar wahrnehmbaren Dingen zu Hilfe, so verschwinden die Unterschiede, und es zeigt sich alle Energie als elektrisch, bzw. elektromagnetisch (586 u. f.), wie es hier am Falle der chemischen Energie noch näher erläutert werden soll.

Wenn in Voltas Element das Zinkion die Zinkplatte verläßt, so ist es, nach Leistung einer gewissen Abtrennungsarbeit durch die Molekularkräfte des Wassers (203), gänzlich getrennt von seinen zwei Valenzelektronen, die in der Zinkplatte zurückbleiben. Die Zinkionen diffundieren dann mittels der Wärmebewegung in die Flüssigkeit, sind aber durch ihre Kraftlinien zunächst noch mit den Elektronen in der Platte verbunden. Immer weiter nachdrängende Kraftlinien weiter noch losgelöster Zinkionen lassen die Enden der Kraftlinien wandern, was ohne vollständige Mitbewegung der ursprünglich die Enden bildenden Elektrizitätsquanten erfolgen kann. indem die Enden stetig wechseln, wie wir es schon früher erläutert und in Abb. 85 dargestellt haben (85, 86, s. auch 125 u. f.). So kommen die positiven Enden der Kraftlinien an H-Ionen der Säure und die negativen, am metallischen Stromleiter entlang gleitend, zuletzt an Elektronen der Kupferplatte, an deren Oberfläche die Kraftlinien wieder Atomabmessung annehmen, indem sie sich unter Mitnahme der Elektronen aus der Kupferplatte in benachbarte Wasserstoffionen zusammenziehen, die dabei entladen werden. Unterwegs durchlaufen die Kraftlinien die Umgebung des ganzen Stromkreises (vgl. 93, 125), wobei sie — wegen dessen Widerstandes —

zum Teil auch in denselben versinken (162 u. f.). Kraftlinien sind aber Energie (129) und zwar sind sie hier die chemische Energie der gelösten Zinkatome; denn diese Energie haben die Atome, zugleich mit den abgegebenen Kraftlinien ihrer Valenzelektronen, bei der Lösung verloren, wie wir sahen. Diese Kraftlinien, d. i. diese chemischen Energiemengen wandern in der beschriebenen Weise durch die Umgebung des Stromkreises. Der dabei in den Leitern versinkende Teil gibt die Stromwärme (sofern nicht auch chemische oder magnetische Stromwirkungen erfolgen); der Rest geht — wie angegeben — in die Wasserstoffionen an der Kupferplatte und erteilt damit dem entweichenden Wasserstoff seine volle chemische Energie, von der er einen Teil verloren hatte, seit er zu der im Element verwendeten Schwefelsäure gebunden war. Es ist somit die Differenz der chemischen Energien des Zinks und der äquivalenten Menge Wasserstoffs, die als elektrische Energie im Stromkreis zu Wärme-, chemischen oder magnetischen Wirkungen verfügbar wird, und man sieht, wie elektrische und chemische Energie dasselbe sind, nämlich Energie elektrischer Kraftlinien.

209. Chemische Energie als Teil der elektrischen Gesamtenergie der Atome. — Ist an dem soeben betrachteten lehrreichen Beispielsfall ersichtlich geworden, daß der Inhalt an chemischer Energie, welcher den elektropositiven Atomen eigen ist, im wesentlichen in den elektromagnetischen Kraftfeldern ihrer Valenzelektronen besteht, so ist damit wohl die Annahme gerechtfertigt, daß auch alle sonstige chemische Energie irgendwelcher Stoffe nur Teil der elektromagnetischen Energie von deren Atomen sei, nicht eine besonders geartete Energieform, und es steht dies auch mit nichts Bekanntem in Widerspruch.

Die genaue Trennung der Kraftfelder der chemischen Energie eines Atoms von den übrigen Kraftfeldern seines Inneren ist eine besondere Frage, zu deren Beantwortung genügende Einzelkenntnis des Atominneren fehlt. Man sieht aber, daß *überhaupt nicht ein für alle Mal ein bestimmter Teil der Kraftfelder als chemische Energie angebbar* sein kann: denn ein und dasselbe Atom zeigt verschiedenen anderen Atomen gegenüber sehr verschieden große chemische Energien, wobei auch *immer die Kraftfelder des anderen Atoms ihren Beitrag* liefern.

Zum Beispiel zeigt Zink mit Chlorgas größere chemische Energie als mit Sauerstoff, mit Brom weniger und mit Jod noch weniger, was an den verschieden großen Wärmemengen meßbar wird (W 126), die bei den betreffenden Vereinigungen gleicher Zinkmengen frei werden. Die *Reihenfolge* der Elemente Cl, Br, J ist hier dieselbe wie in *Voltas Spannungsreihe* (136); Chlor ist am meisten elektronegativ, bindet also die Valenzelektronen am festesten, weshalb auch das Chlorid am beständigsten ist (vgl. 201).

Die angegebene Abstufung der Wärmemengen *bei* der Bindung zeigt, daß bei der Chloridbildung ein größerer Teil der die chemische Energie ausmachenden elektromagnetischen Kraftfelder der einander bindenden Atome entweicht als bei der Bromidbildung und bei dieser mehr als bei der Jodidbildung. Dies kann damit zusammenhängen, daß Chloridmoleküle (z. B. des Zinks oder des Kaliums) einen kleineren Raum einnehmen als Bromidmoleküle und diese einen kleineren als Jodidmoleküle, obgleich die Raumeinnahme der Atome Cl, Br und J sehr nahe gleich ist. Es gehen also bei der festesten Bindung die Atome am meisten ineinander, was auch in anderen Fällen zu bemerken ist, und dieser größten Raumverringerung entspricht auch die größte Abgabe elektromagnetischer Felder als chemischer Energie nach außen, an Nachbarmoleküle, wo sie als Erwärmung meßbar wird.

Auch bei den elektropositiven Atomen können die chemischen Energien durch die bei der Vereinigung mit einem Vergleichselement, z. B. Sauerstoff, freiwerdende Wärme beurteilt werden. Man findet auch hier, wie bei Cl, Br, J und wie auch schon vorher bei Zn und H, *Parallelität mit der Spannungs*-

reihe. Die Größenabstufung der Verbrennungswärmen der Metalle in Mengen, die jeweils 1 gr Wasserstoff äquivalent sind, die also gleichviel Valenzelektronen enthalten, geht von Al (mit 95 Kal) über Mg, Li, K, Zn, Pb, Cu, Hg (mit 10 Kal) bis zu den Edelmetallen Pt, Au, die gar keine Verbrennungswärme geben, und in dieser Reihenfolge stehen diese Elemente nahezu auch in der Spannungsreihe. Diese Verbrennungswärmen können als Energien der Kraftfelder der Valenzelektronen der verbrannten Atome aufgefaßt werden; denn diese Elektronen gehen bei der Verbrennung an die Sauerstoffatome und halten diese dann fest, wobei sie samt den Sauerstoffatomen ins Innere des Metallatoms dringen, was die kleinen Raumeinnahmen der Oxydmoleküle zeigen. Dabei geht der als Verbrennungswärme gemessene Teil der Energie dieser Kraftfelder in kinetische Energie der Atome und dann der ganzen Umgebung, d. i. in die Wärme über (vgl. W 128).

Ein reines Maß für die Änderungen des chemischen Energieinhaltes von Atomen sind jedoch die bei Bindungen oder anderen chemischen Umsetzungen gemessenen Wärmemengen nicht (vgl. W 130). Denn alle chemischen Vorgänge schließen auch Wirkungen von Molekularkräften in sich — von Arbeitsaustausch mit der Umgebung bei Volumänderungen abgesehen —, wie Aggregatzustandsänderungen, Zerfall oder Bildung mehratomiger oder polymerisierter Moleküle, Anlagerungen wie die von Wasser an Lösungsmoleküle, Ionenbildung und dergleichen, und die hierbei freiwerdenden oder verbrauchten, mitgemessenen Wärmemengen gehören nicht der chemischen Energie, sondern den anderen, die Molekularkräfte bewirkenden Teilen der inneren elektromagnetischen Felder der betreffenden Atome an, ohne daß scharfe Trennung ausgeführt wäre. Vielleicht gehen die elektromagnetischen Felder der chemischen Kräfte und der Molekularkräfte eines Atoms überhaupt ineinander über.

210. Konstante Elemente. — Voltas Element hat den Mangel, daß seine Wirksamkeit bei einigermaßen starker Stromabnahme schnell sinkt. Dies ist einerseits Folge steigenden inneren Widerstandes des Elements wegen der Wasserstoffgasblasen am Kupfer (205), andererseits sinkender elektromotorischer Kraft wegen Aufnahme von Wasserstoff in das Kupfer. Metalle nehmen leicht Gase auf, besonders wenn sie einatomig dargeboten sind, wie der elektrolytisch aus den Ionen gebildete Wasserstoff an der Kupferplatte, und Gasgehalt ändert oft stark die Stellung des Metalls in der Spannungsreihe. Das wasserstoffhaltige Kupfer ist elektropositiver als reines Kupfer, verhält sich ähnlich dem Zink, und gibt daher mit dem Zink ein Element verringerter elektromotorischer Kraft In Strompausen erholt sich das Element wieder; die Gasblasen und wohl auch aufgenommener Wasserstoff verlassen dann das Kupfer.

Um diese Inkonstanz zu umgehen, muß die Wasserstoffentwickelung verhindert werden, was in den verschiedenen „konstanten Elementen" in verschiedener Weise geschieht. Tab. 48 zeigt die Zusammensetzung einiger dieser Elemente mit Angabe ihrer elektromotorischen Kräfte; die vertikalen Striche bedeuten Grenzflächen der verschiedenen Stoffe; die unterstrichenen Stoffe sind flüssig; aneinander grenzende verschiedene Flüssigkeiten werden meist durch eine poröse Tonzelle getrennt.

Im „Daniell-Element" steht das Kupfer in Kupfersulfatlösung, so daß gar kein Wasserstoff, sondern nur Kupfer am Kupfer sich abscheidet. Hier bleibt die Stoffverteilung im Element nahe unverändert beim Gebrauch, nur daß das Zink dünner und das Kupfer dicker wird; daher auch keine Änderung der elektromotorischen Kräfte. In gleicher Weise wirkt das „Clark-Element", in welchem Kupfer durch Quecksilber (im „Weston-Element" außerdem Zink durch Kadmium) ersetzt ist. Seine elektromotorische Kraft fällt immer gleich aus und ist von größter Konstanz, weil die nötigen Stoffe in großer Reinheit erhältlich und die zwei Salze in Überschuß im Element

Tab. 48. Galvanische Elemente. EMK.

Volta	Zn	H_2SO_4		Cu	fast 1 Volt
Daniell	Zn	H_2SO_4	$CuSO_4$	Cu	1·1 Volt
Bunsen	Zn	H_2SO_4	HNO_3	C	1·8 „
„	Zn	Chromsäure		C	fast 2 „
Trocken-El. . .	Zn	H_4NCl	MnO_2	C	1·5 „
Clark	Zn	$ZnSO_4$	Hg_2SO_4	Hg	1·429 Volt[1])
Akkumulator . .	Pb	H_2SO_4		PbO_2	2·0 Volt

[1]) Bei 18° C.

vorrätig gehalten sind, so daß auch keine Konzentrationsänderungen vorkommen. Solche Elemente benutzt man nicht als Stromquellen, sondern als „Normalelemente" mit stets gesichert vorhandener elektromotorischer Kraft, gleichsam zur Aufbewahrung des Volt (vgl. 356); man eicht damit z. B. Quadrantelektrometer in Volt.

Die anderen konstanten Elemente arbeiten zwar mit Wasserstoffabscheidung, aber der Wasserstoff wird sofort, wohl noch einatomig, wie er aus den Jonen entsteht, durch Oxydationsmittel zu Wasser gemacht; Gasblasen entweichen also hier ebenfalls nicht. In den zweierlei von Bunsen eingeführten, früher für starke Ströme unentbehrlichen Elementen sind konzentrierte Salpetersäure, bzw. Chromsäure die Oxydationsmittel; im „Trockenelement" (oder „Leclanché-Element"), das übrigens nur außen trocken ist, ist es Mangansuperoxyd (Braunstein).

211. Akkumulator. — Eine besondere Art konstanter Elemente sind die Akkumulatoren mit zwei Bleiplatten in verdünnter Schwefelsäure. Beide Platten sind mit viel Oxyden des Bleies bedeckt. Ist die Bedeckung bei beiden gleich, so fehlt die elektromotorische Kraft; der Akkumulator ist dann „ungeladen". Um ihn zum Element mit der sehr nahe konstanten elektromotorischen Kraft von 2 Volt zu machen, muß er mit Hilfe einer anderweitigen Stromquelle „geladen" werden. Er verhält sich in dieser Hinsicht wie eine Kleistsche Flasche, die man lädt, um in ihr elektrische Energie bis zum Gebrauch aufzubewahren. Die Notwendigkeit einer Ladestromquelle war der Grund, warum Akkumulatoren erst nach Einführung der Induktion, als einer von Elementen unabhängigen Stromquelle (375), in umfassenden Gebrauch kommen konnten. Beim Laden wird durch Wasserelektrolyse (vgl. 177) an der Anodenplatte Bleisuperoxyd (PbO_2) gebildet (rotbraun), während die Kathodenplatte zu reinem Blei reduziert wird (grau); Knallgas entweicht solange nicht, bis diese Vorgänge alle der Säure zugänglichen Teile der porösen Platten ergriffen haben. Die Ladung ist dann beendet. Bei der Entladung läuft der Strom in umgekehrter Richtung (vgl. 202); sein Ursprung ist derselbe wie in Voltas Element, nur daß an Stelle des Zinks Blei wirkt und daß die Wasserstoffabscheidung an der anderen Platte durch das Bleisuperoxyd beseitigt wird, wie beim Trockenelement (210) durch das Mangansuperoxyd.

Die beim Laden aufgewendete elektrische Energie wird im Akkumulator als chemische Energie aufgespeichert, nämlich als Vorrat metallischen Bleies an der einen Platte und lose im Superoxyd gebundenen Sauerstoffs an der anderen Platte. Es wirken aber auch die Jonen der Schwefelsäure mit, indem beim Entladen das Blei nicht nur zu Oxyd, sondern zu Sulfat wird, so daß für die Beurteilung der Energie in Wärmemengen (vgl. 207) nicht nur die Verbrennungswärme des Bleies, sondern auch die Neutralisationswärme von Bleioxyd und Schwefelsäure maßgebend ist; daher die hohe elektromotorische Kraft von 2 Volt, welche von keinem

anderen Element übertroffen wird. Die chemische Energie des geladenen Akkumulators ist dabei als elektromagnetische Energie der Valenzfelder der mitwirkenden Stoffe (208, 209) in etwas verwickelter Art unter diesen verteilt, zum Unterschied von der geladenen Kleistschen Flasche, wo die Energie im sehr einfach beschaffenen, im Glas der Flasche befindlichen elektrischen Felde sitzt. Die besondere Brauchbarkeit des Bleies für den Akkumulator beruht auf seiner leichten Oxydierbarkeit, auf der Fähigkeit das besonders sauerstofftragende Superoxyd zu bilden und auf der sehr geringen Löslichkeit aller seiner Oxyde und seines Sulfats in der verdünnten Schwefelsäure. Das Sulfat bleibt daher an den Platten und gibt bei der Ladung seine Schwefelsäure wieder in die Flüssigkeit zurück. Das spezifische Gewicht der Flüssigkeit steigt dementsprechend bei der Ladung; es sinkt wieder bei der Entladung durch Rückbildung von Wasser an der Superoxydplatte.

Die Energieaufspeicherung im Akkumulator ist viel größer als die in Kleistschen Flaschen. Ein mittelgroßer, tragbarer Akkumulator vermag z. B. 25 Weberstunden aufzunehmen und dann wieder abzugeben, d. h. 25 Stunden lang 1 Weber oder 5 Stunden lang 5 Weber oder 2·5 Stunden lang 10 Weber (mehr Strom hält er nicht gut aus). Da 1 Webersekunde = 1 Coulomb ist (151), sind dies 90000 Coulomb, was mit der beim Laden dauernd vorhandenen Spannung von 2 Volt 180000 Voltcoulomb = 18000 mkgr bedeutet. In dem früher eingehend betrachteten Falle einer Batterie Kleistscher Flaschen (119—121) waren es nur 160 Voltcoulomb = 16 mkgr. Man sieht die mehr als tausendfach größere Aufspeicherung im Falle des Akkumulators. Die Aufspeicherung ist beim Akkumulator auch dauerhafter wegen der geringen Verluste bei der kleinen Spannung.

Der Akkumulator zeigt die für chemische Energie kennzeichnende, stark konzentrierte Aufbewahrbarkeit großer Energiemengen in kleinen Räumen. Er wird darin allerdings noch übertroffen durch ein Stück Kohle von 1 kgr Gewicht, das kleiner ist als der betrachtete Akkumulator und doch, zusammen mit dem zugehörigen Sauerstoff, 3400000 mkgr Energie verfügbar hat (W 126), also fast 200mal so viel als der geladene Akkumulator, allerdings nicht in so leicht und allgemein verwendbarer Form wie dieser.

d) Wärmewirkungen elektrischer Ströme.

212. Stromwärme. — Wenn in einem Stromkreis nichts vorgesehen ist, um chemische oder magnetische Wirkungen hervorzubringen, geht die ganze von der Stromquelle fortdauernd gelieferte Energie in Wärme über. Es ist bei der elektrischen Energie wie bei jeder anderen Energieform: wenn nichts Besonderes daraus wird, wenn sie zu verschwinden scheint, geht sie in Wärme über. Wärmeentwickelung elektrischer Ströme ist sogar eine unvermeidliche, wenn auch stark einschränkbare Nebenwirkung derselben, ganz wie es Reibungswärme bei mechanischen Vorgängen ist.

Die Stromwärme erscheint immer im Inneren der Leitung, dort wo der Strom fließt; auf den Aggregatzustand des Leiters kommt es dabei nicht an, wohl aber auf dessen Widerstand (156), und zwar ist die Wärmeentwickelung einfach proportional dem Widerstand. Dem entspricht es, daß wir bei den Entladungen Kleistscher Flaschen nur die dünnen Drähte erglühen sahen (117).

213. Stromwärmegesetz. — Außer vom Widerstand W hängt die Wärmeentwickelung nur noch von der Stromstärke J ab. Von der Stromrichtung ist sie unabhängig; es tritt bei Stromumkehr nicht Kälte statt Wärme auf. Deshalb kann die Wärmeentwickelung auch nur einer geraden Potenz der Stromstärke proportional sein, im einfachsten Fall der zweiten, und dies entspricht auch der Wirklichkeit.

Zusammengefaßt ist die in der Zeiteinheit in einem Leiter erscheinende Wärmemenge proportional J^2W. Dies ist das Stromwärmegesetz; es wurde von Joule durch kalorimetrische Messungen gefunden (1841). Diesem

Gesetz entsprechend erscheint Wärme in jedem stromdurchflossenen Leiterstück, je nach dessen Widerstand.

Wegen der Proportionalität mit dem Quadrat der Stromstärke sind bei starken Strömen die Wärmewirkungen besonders hervortretend. Der verzehnfachte Strom bringt nur verzehnfachte chemische Wirkung hervor und auch nur verzehnfachte magnetische Kräfte, aber verhundertfachte Wärmewirkung.

214. Der Begriff „Strom" gesichert festgehalten. — Da Joule bei seinen Messungen die magnetischen und die chemischen Wirkungen, nämlich das Galvanometer (155) und das Voltameter (175), zur Feststellung von Stromstärken benutzte, hat er in Wirklichkeit den Vergleich der Wärmewirkungen mit diesen beiden Wirkungen ausgeführt, nachdem Faraday schon diese beiden miteinander verglichen und einander proportional gefunden hatte (174). Der unmittelbare Anschluß an Messungen von Elektrizitätsmengen, d. i. an Stromstärken nach deren Begriffsbestimmung (Definition, 151), ist durch die Untersuchung der magnetischen Wirkungen geliefert, worauf wir später eingehen (299). Bemerkenswerte, den Anschluß sichernde Anhaltspunkte haben auch schon die chemischen Stromwirkungen gegeben, indem abgeschiedene Jonenmengen geradezu Proportionalmaß der Elektrizitätsmengen des abscheidenden Stromes sein müssen, da die Elementarquantladungen der Jonen auch einzeln im elektrischen Feld übereinstimmend gemessen werden konnten (193—195).

215. Übereinstimmung mit dem Energiegesetz. — Außerdem ist der große, feste Zusammenhang aller Gesetze der Stromwirkungen mit der übrigen Kenntnis unter richtiger Festhaltung des Begriffes „Strom", als Elektrizitätsmengen-Transport, gesichert durch die Übereinstimmung von Joules Stromwärmegesetz mit dem Energiegesetz. Es ist nämlich das erstere aus dem letzteren und aus Ohms Gesetz als Folgerung, d. i. als in diesen schon einbegriffen, herleitbar in folgender Weise:

Wärme ist Energie (W 68—76); wenn also in einem Leiterstück infolge elektrischen Stromes Wärme entsteht — ohne andere Energieleistungen — muß dafür nach dem Energiegesetz elektrische Energie in der richtigen Menge in dem Leiterstück verschwinden. Die verschwindende Energie ist aber aus der Spannung V an den Enden des Leiterstücks und der Stromstärke J angebbar (119); denn gegen diese Spannung V arbeitet die Stromquelle an dem Leiterstück. Der Strom fließt nämlich wohl im Leiterstück im Sinne dieser durch die Stromquelle bewirkten Spannung V; bei Stillstand der Stromquelle würde aber von den Enden des Leiterstücks aus, eben vermöge der dort vorhandenen Spannung V eine Rückentladung auf dem Wege durch die Stromquelle stattfinden (dem Pfeile p in Abb. 100 entgegengerichtet, wenn a b das betrachtete Leiterstück ist). Die Spannung am Leiterstück ist also für die Stromquelle Gegenspannung; sie wird bei dauernder Unterhaltung des Stroms dauernd von der überwiegenden Spannung der Stromquelle unter Arbeitsleistung überwunden. Ist J die Stärke des Stromes, so liefert — entsprechend der Begriffsbestimmung von „Strom" — die Stromquelle in der Zeiteinheit die Elektrizitätsmenge J in das Leiterstück entgegen dessen Spannung V, und es ist somit VJ die in der Zeiteinheit an das Leiterstück abgegebene Energie (119). Diese Energie verschwindet im Leiterstück als elektrische Energie, und da keine andere Energieform dort erscheint, als nur Wärme, so muß die Wärmeentwickelung

nach dem Energiegesetz durch VJ gegeben sein. Es ist aber nach Ohms Gesetz V = JW (163), also mit Hinzunahme dieses Gesetzes die Wärmeentwickelung $VJ = J^2W$, und dies ist in der Tat das Stromwärmegesetz. Damit ist die widerspruchslose Zusammengehörigkeit von Stromwärmegesetz, Energiegesetz und Ohms Gesetz erwiesen.

Zugleich ist zu sehen, daß die Wärmeentwickelung unmittelbar, ohne Proportionalitätsfaktor, durch J^2W gegeben ist, wenn die Wärmemengen als Energiemengen in elektrischen Einheiten gerechnet werden, d. i. in Voltcoulomb, die Wärmeentwickelung in der Zeiteinheit also im Voltcoulomb/sek = Voltweber, wie VJ.

Will man in anderen Einheiten rechnen, die unabhängig von den elektrischen Einheiten gewählt sind, so ist zu berücksichtigen, daß nach der Festsetzungsart von Volt, Coulomb und Weber 1 Voltcoulomb = 0·102 mkgr ist (120) oder, da 1 Kal = 427 mkgr (W 75), 1 Voltcoulomb = 0·000239 Kalorien.

Die feste Einfügung des mit den Messungen der Wärmemengen übereinstimmenden Stromwärmegesetzes in die Gesamtkenntnis, durch seine Übereinstimmung mit dem Energiegesetz, ist höchst bemerkenswert, weil die Vorgänge im Stromleiter, welche zur Wärmeentwickelung führen, je nach der Beschaffenheit des Leiters (Metall, Elektrolyt, Gas) sehr verschieden und teils auch — besonders in den Metallen — noch wenig geklärt sind, und weil es doch, wie das Gesetz zeigt, nur auf die durch den Leiter gehende Elektrizität ankommt, gleichgültig also in welcher Weise und unter welchen Begleitumständen sie durch den Leiter getragen wird. Der Begriff „Strom", der nur auf durchgehende Elektrizitätsmengen sich stützt, zeigt sich hier in besonderer Bewährung als völlig naturangemessen.

216. Elektrische Leistung. — Die Energielieferung in der Zeiteinheit, auch „Leistung" genannt (M 293), welche der Strom J in einem Leiter bewirkt, dessen Enden die Spannung V zeigen, ist nach der vorhergegangenen Überlegung durch das Produkt VJ in Voltcoulomb/sek = Voltweber berechenbar. Dies gilt nach dem Energiegesetz für jede Art von Leistung, sei sie Wärmeentwickelung oder chemischer Art durch Elektrolyse oder auch mechanische Leistung durch magnetische Wirkung, z. B. in Motoren, worauf wir später eingehen.

Die Leistung in Form von Wärme wird immer richtig als J^2W berechnet, indem für diesen Fall im allgemeingültigen Produkt VJ V = JW zu setzen ist als die Gegenspannung, welche nach Ohms Gesetz vom vorhandenen Leitungswiderstand W allein hervorgebracht wird; die Stromarbeit gegen den Leitungswiderstand geht eben immer in Wärme auf, ganz wie mechanische Reibungsarbeit.

Liegt gleichzeitig chemische Wirkung vor, so kommt, wie wir sahen (202), zur Spannung JW noch die Polarisations- oder Zersetzungsspannung V_0 als Gegenspannung hinzu, welcher die zusätzliche Leistung $V_0 J$ in der chemischen Form entspricht, und ähnlich tritt bei Leistungen durch magnetische Wirkung ebenfalls eine besondere Gegenspannung auf (376), welche für die magnetische Leistung maßgebend ist.

Die elektrische Leistungseinheit Voltweber wird auch Watt genannt. Es ist nach den vorher angegebenen Umrechnungszahlen 1 Watt = 0·102 mkgr/sek = 0·000239 Kal/sek. Für größere Leistungen wird das Kilowatt = 1000 Watt als Einheit benutzt. Es ist 1 Kilowatt = 102 mkgr/sek oder, da 75 mkgr/sek = 1 Pferdestärke, 1 Kilowatt = 1·36 PS, weshalb das Kilowatt auch rund die elektrische Pferdestärke genannt wird.

Das Produkt aus Leistung und Zeit bedeutet wieder Arbeit; es ist 1 Kilowattstunde = 367000 mkgr = 860 Kalorien in runder Zahl. Die Kilowattstunde liefert also etwa soviel Wärme wie das Verbrennen von 100 gr Kohle.

Da für die Leistung das Produkt aus Spannung und Strom maßgebend ist, kann für eine bestimmte Leistung jeder der beiden Faktoren beliebig groß und der andere entsprechend klein

gewählt werden. So kann 1 Kilowatt ebensogut mit 1000 Volt bei 1 Weber als mit 1 Volt bei 1000 Weber erhalten werden.

217. Verteilung der Wärme im Stromkreis. — Da J^2W die Wärmeentwickelung in jedem Teil vom Widerstand W eines Stromkreises mit dem Strom J ist, so ist $J^2\Sigma W$ die Gesamtwärmeentwickelung des Stromes J, wobei ΣW den Gesamtwiderstand des Kreises bedeutet. Ein Teil der Gesamtwärme entfällt stets auch auf die Stromquelle; diese erwärmt sich auch, jedoch nur nach Maßgabe ihres Widerstandes. Je kleiner ihr Widerstand im Verhältnis zum Gesamtwiderstand ist, desto mehr bleibt sie kalt und geht die Wärme an die äußeren Teile des Kreises. Es ist dies der früher schon gedachte Fall der Wärme-Fernwirkung (206). Durch die Verteilung der Widerstände im Stromkreis kann dessen Gesamtwärmeentwickelung beliebig verteilt werden; je mehr der Gesamtwiderstand in einen einzelnen Teil des Kreises verlegt wird, desto mehr konzentriert sich dort die Wärmeentwickelung. Hierauf beruhen die zahlreichen Anwendungen der Stromwärme, wie elektrische Heizung und Beleuchtung.

Die durch Stromwärme erreichbaren Temperaturen sind nur durch die Hitzebeständigkeit des Stromleiters begrenzt, nicht wie bei Wärmeentwickelung chemischer Vorgänge durch die spezifische Wärme der Produkte derselben und durch die thermische Dissoziation (W 128, 124). Man kann durch Stromwärme jeden Leiter zum Schmelzen oder zum Verdampfen bringen; man erreicht auf elektrischem Wege die höchsten überhaupt herstellbaren Temperaturen bis zur Weißglut.

Die Wärme würde sich in jedem Stromleiter sogar ins Unbegrenzte häufen, wenn nicht stets Wärmeabgabe an die Umgebung stattfände. Die Temperatur eines Stromleiters steigt bei fortlaufendem Strome solange, bis sie jene Höhe erreicht hat, bei welcher die mit der Temperatur steigenden Wärmeverluste gleich geworden sind der fortlaufenden Wärmezufuhr durch den Strom. Die damit gegebene Endtemperatur wird um so schneller erreicht, je kleiner der kalorimetrische Wasserwert (W 50) des Leiters ist.

218. In körperlichen Leitern ist das Stromwärmegesetz auf jedes Raumelement anzuwenden, und es kommt für die Wärmeentwickelung in demselben auf dessen Widerstand und das Quadrat der durchgehenden Stromstärke an. Es wird daher die meiste Wärme dort erscheinen, wo der Gesamtstrom in dem Leiter den kleinsten Querschnitt vorfindet.

So wird beim Stromdurchgang in der Vorrichtung Abb. 109, wo der Strom von einer aus isolierender Hülle hervorragenden kleinen Platinspitze p aus durch verdünnte Schwefelsäure zur großen Bleiplatte b b fließt, die meiste Stromwärme an der Spitze p auftreten. Die Folge ist starke Erhitzung mit Dampfentwickelung und Glüherscheinung dort; Elektrolyse tritt hier gegenüber der Wärmewirkung zurück, besonders bei starken Strömen. Die Dampfblase an der Spitze verhindert aber als sehr schlechter Leiter den weiteren Stromdurchgang, wodurch Abkühlung und nach Verschwinden der Dampfblase Wiederholung der Erscheinung eintritt. Es kann das leicht vielmals in der Sekunde stattfinden, so daß ebensooftmalige selbsttätige Stromunterbrechung stattfindet, weshalb die Vorrichtung zu einfachster Herstellung starker intermittierender Ströme Anwendung findet („Flüssigkeitsunterbrecher").

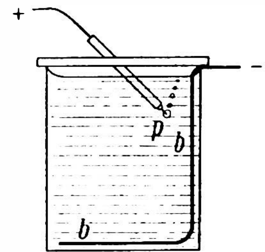


Abb. 109.
Flüssigkeitsunterbrecher.

219. Der elektrische Bogen zeigt Wärmewirkung in leitendem Gase. Er entwickelt sich zwischen zwei mit einer ergiebigen Stromquelle von mindestens 50 Volt Spannung verbundenen Kohlen oder auch Metallstücken, wenn dieselben erst Berührung haben und dann auseinandergezogen werden. Die anfängliche Berührung ist notwendig, weil

die Luft erst von der Berührungsstelle aus heiß werden muß, um zu leiten, worauf sie, durch den Strom stetig weiter geheizt, genügend leitend bleibt, wozu wir Einzelheiten später betrachten (513). Daß heiße Gase nicht ganz schlechte Leiter sind, zeigte schon die Bunsenflamme (4). Der Bogen ist aber weit heißer als diese Flamme; er kann mit der Bunsenflamme nicht entzündet werden, wenn die Kohlen auseinander sind; wohl aber kann man ihn leicht mit dem Munde ausblasen, wie eine Kerzenflamme, weil die kalte Luft nicht leitet um den Strom zu ermöglichen, der seinerseits die genügende Weiterheizung und damit Steigerung der Leitfähigkeit gibt. Die Bunsenflamme löscht den Bogen sogar ebenfalls aus, weil sie zu kalt ist.

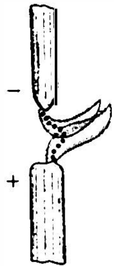


Abb. 110. Elektrischer Bogen (mit Metall) ..... Strombahn.

Der Bogen ist eine Stromerscheinung im Gegensatz zu den Funken, die wir als Spannungserscheinung bezeichnet hatten (26). 50 Volt Spannung, die bei nicht zu viel Widerstand im Stromkreis schon einen guten Bogen bis zu einigen Millimetern Länge geben, würden kaum 0·01 mm Funkenlänge liefern. Dagegen braucht der Bogen zu seiner Unterhaltung mindestens einige Weber Stromstärke, während der Funke bei vorhandener Spannung auch ohne weiteren Elektrizitätsvorrat entsteht; ist genügender Vorrat da, so kann der Funke in den Bogen übergehen.

Bei näherem Besehen (mit genügendem Schutz der Augen) zeigt sich der „Bogen", wenn er in einiger Länge entwickelt ist, aus zwei Flammen bestehend, die aus den Kohlen entweichen, etwa wie es Abb. 110 darstellt. Besonders wenn Metall gegenwärtig ist, sei es an den Kohlen oder indem man statt der Kohlen Metallstäbe nimmt, bilden sich die Flammen gut aus; bei zu kurzem Abstand der Kohlen verschmelzen sie leicht zu einem bogenförmigen leuchtenden Gebilde, wovon der elektrische Bogen seinen Namen hat. Der Strom nimmt seinen Weg von Kohle zu Kohle unabhängig von der Flammenform, etwa wie die punktierte Linie der Abb. 110 es zeigt, doch in starker Ausbreitung von den beiden Ansatzpunkten aus. Verlieren die beiden, sehr beweglichen Flammen einen Augenblick ihre gegenseitige Berührung, so ist der Strom unterbrochen und der Bogen erlischt.

Die größte Wärmeentwickelung findet auch hier, dem Stromwärmegesetz entsprechend (vgl. 218), an den Stellen kleinsten Querschnittes der Leitung statt, nämlich an den Ansatzstellen der Flammen an den Kohlen. Dort findet auch die stärkste Lichtemission statt, und die Temperatur wird bei nicht zu schwachem Strom leicht 3000° (W Tab. 27).

Die Flammen sind glühender Kohlenstoffdampf, bzw. an Metallstäben Metalldampf, der an den heißen Ansatzstellen entweicht; der dampfförmige Kohlenstoff scheint bei der hohen Temperatur mit dem Stickstoff der Luft sich zu verbinden, zuletzt ohne Zweifel mit dem Sauerstoff. Metallstäbe als Träger des Bogens schmelzen schnell ab, wenn sie nicht wassergekühlt sind, weshalb die Kohlen auch dann besser brauchbar sind, wenn die Lichtemission glühender Metalldämpfe beobachtet werden soll. Man bringt dazu das Metall oder eine Verbindung desselben auf die positive Kohle (vgl. 513). Die Bogenflammen haben eine geschichtete Temperaturverteilung; die Schichten umschließen einander, alle in Flammenform, von der äußersten, kältesten Schicht, die den Saum der ganzen Flamme bildet, bis zur innersten, heißesten und kleinsten, die zugleich die Ansatzstelle der ganzen Flamme ist. Diese Temperaturverteilung zeigt, daß die Flammen hauptsächlich von ihren Ansatzstellen aus geheizt sind, wo die stärkste Stromwärmeentwickelung stattfindet. Die der Temperaturverteilung entsprechende Verteilung der

Lichtemission der Metalldämpfe in den Bogenflammen nach Spektralserien ist in der Optik behandelt (O 82).

In den Quecksilberbogenlampen, die wir als reiche Quellen ultravioletten Lichtes erwähnten (O 98), geht die Bogenentladung zwischen Quecksilberoberflächen unter Luftausschluß in einem Quarzrohr vor sich.

220. Hitzdraht-Strom- und Spannungsmesser. — So wie die magnetischen und die chemischen Wirkungen können auch die Wärmewirkungen der Ströme zu deren Messung dienen. Die dazu geeigneten Instrumente sind im Grunde Metallthermometer. Der zu messende Strom geht durch einen dünnen Draht a b c, Abb. 111, der infolge der Stromwärme sich dehnt, und die Dehnung wird, beispielsweise durch eine an der Drahtmitte angreifende Hebel- oder Rollen-Vorrichtung, in Vergrößerung auf den Zeiger übertragen. Die Skaleneinteilung muß empirisch, d. h. durch Vergleichung mit geeichtem Galvanometer oder unmittelbar mit dem Voltameter hergestellt werden; denn die für die Endtemperatur des Drahtes und daher für die Zeigerstellung maßgebenden Wärmeverluste (217) sind nicht gut berechenbar. Die Skaleneinteilung kann auch nur bei dauernd gleich gehaltener Umgebung des Drahtes gültig bleiben; denn von der Umgebung hängen die Wärmeverluste ab. Die Hitzdraht-Instrumente brauchen verständlicherweise (217) immer etwas Zeit zur endgültigen Zeigereinstellung.

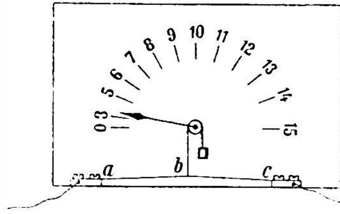


Abb. 111. Hitzdraht-Strommesser.

Gibt man dem Hitzdraht einen sehr großen Widerstand, so kann die Skale eine Eichung in Volt erhalten (165), und man hat dann einen Hitzdraht-Spannungsmesser.

221. Vorgänge bei der Wärmewirkung der Ströme. — Wärme ist Bewegung der Moleküle, und es ist daher im allgemeinen verständlich, daß Strom im Leiter Wärme geben muß, sofern die im Leiter fortbewegte Elektrizität von Atomen oder Molekülen des Leiters getragen wird. Diese Träger müssen bei ihrer Bewegung in Stromrichtung, oder — je nach dem Zeichen ihrer Ladung — entgegen derselben, durch Zusammenstöße mit den anderen Molekülen oder Atomen des Leiters auch diese in Bewegung setzen, und die so entstehende ungeordnete Bewegung ist eben die Stromwärme.

In dieser Weise ist die Entstehung der Stromwärme in den Elektrolyten vollkommen verständlich; hier werden die Elektrizitäten des Stromes in der Tat ausschließlich durch die Ionen getragen (186). Ebenso sind auch bei der Elektrizitätsleitung in Gasen (503 u. f.) materielle Elektrizitätsträger vorhanden, die wie Gasmoleküle sich verhalten (W 109).

Weniger bekannt sind die Einzelheiten der Entstehung der Stromwärme in den Metallen, wo die Elektrizitätsleitung wohl hauptsächlich durch Elektronenbewegung stattfindet (13, 511). Es setzen wohl die der Stromrichtung entgegen bewegten Elektronen (148) auch die Metallatome in Bewegung, was Erwärmung bedeutet, so wie auch umgekehrt die wärmebewegten Moleküle die Elektronen in den Metallen in Bewegung setzen, wie es die Wärmeleitung zu zeigen scheint (W 142); aber Eingehendes darüber ist nicht bekannt. Es ist möglich, daß ein Teil des Stromes im Metall durch Ausschwingen positiv geladener Metallatome in Stromrichtung getragen wird, wobei die Atome, unter dem Einfluß der Molekularkräfte, nach Aufnahme der ihnen fehlenden Elektronen unelektrisch wieder zurückkehren, welcher Vorgang bei neuem Elek-

tronenverlust des Atomes sich wiederholt. Auch andere Erscheinungen als nur die Stromwärme zeigen, daß die Atome in den Metallen an der Stromleitung beteiligt sind (s. 318); eine Wanderung der Metallatome aus ihren Gleichgewichtslagen — was Übertragung von Metall in ein anderes, angrenzendes ergäbe — ist aber auch bei stärkstem Stromdurchgang nicht beobachtet worden.

Thermoelektrische Wirkung.

222. Die Stromwärme ist nicht die einzige Beziehung zwischen Wärme und Elektrizität. Noch ein anderer Zusammenhang wurde entdeckt (Seebeck 1821), der nach Voltas Erkenntnis, daß ein geschlossener Kreis aus Leitern der I. Klasse kein dauerndes Fließen der Elektrizität gebe (137), nicht zu erwarten war. Die Entdeckung besteht darin, daß dauerndes Fließen in solchen Kreisen doch stattfindet, wenn die Berührungsstellen der verschiedenen Metalle ungleiche Temperaturen haben. Führt man einem solchen Kreise Wärme zu, um die Temperaturungleichheit aufrecht zu erhalten, so erhält man einen dauernden Strom. Wärme erzeugt hier Strom; man hat eine Umkehrung der vorher betrachteten Stromwärme, wo Strom Wärme erzeugte.

223. Grundversuch. — Am einfachsten nimmt man nur zwei Leiter der I. Klasse und verbindet sie zu einem geschlossenen Kreis, wie es Abb. 112 mit einem Wismutstab Bi (schraffiert) und einem Kupferstreifen Cu darstellt, die an den Stellen a und b verschraubt sind; der doppelt gebogene Kupferstreifen kann viel dünner genommen werden, als das Wismut, weil Kupfer viel besser leitet. Haben beide Berührungsstellen, a und b, gleiche Temperatur, so stehen zwei gleiche Spannungen an diesen Stellen einander gegenüber; sie können daher kein Kreisen der Elektrizität hervorbringen, wie wir dies für drei zusammengeschlossene Leiter schon früher überlegten (137, Abb. 94). Ist aber ein Temperaturunterschied der Berührungsstellen vorhanden, so überwiegt die eine der beiden Spannungen, und das Kreisen der Elektrizität findet statt. Der Strom läuft an der wärmeren Berührungsstelle a vom Wismut ins Kupfer, wie es dem Pfeil in Abb. 112 entspricht. Dieser Strom kann durch eine zwischen den beiden Leitern auf der Spitze s drehbare Magnetnadel NS leicht nachgewiesen werden.

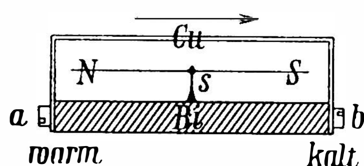


Abb. 112.
Thermoelektrische Wirkung.

Steht die Nadel bei Temperaturgleichheit in der Ebene des Leiterkreises, so wird sie sofort abgelenkt, wenn man eine kleine Alkoholflamme unter a hält, und sie bleibt abgelenkt solange der Temperaturunterschied zwischen a und b bestehen bleibt. Dies zeigt, daß der Strom und also auch der Spannungsunterschied an a und b dauernd an den Temperaturunterschied gebunden ist. Die Vorrichtung ist dabei ihr eigenes Galvanometer (155), indem die Nadel im Stromkreis steht, der hier nur eine einzige Windung enthält. Der Nordpol N der Nadel tritt nach hinten, S nach vorn aus der Windungsebene heraus, wenn die Flamme unter a ist. Wird die Flamme unter b gebracht, so erfolgt die entgegengesetzte Ablenkung der Nadel; der Strom hat also dann die entgegengesetzte Richtung, was aber wieder Stromrichtung vom Wismut zum Kupfer an der wärmeren Berührungsstelle bedeutet.

224. Thermoelement, Thermosäule. — Zur Untersuchung der „thermoelektrischen Spannungen“, „thermoelektromotorischen Kräfte“ oder kurz „Thermokräfte“ beliebiger Leiterpaare fügt man dieselben in Draht- oder Stabform aneinander zu einem „Thermoelement“, wie es Abb. 113 mit den Leitern L_1 und L_2 bei a zeigt, und verbindet die offenen Enden b und c mit einem Galvanometer. Daß dessen Leitungsdrähte aus einem dritten Metall, etwa Kupfer, bestehen und daß also bei b und c neue Thermokräfte hinzukommen können, schadet nichts, falls nur b, c und alle etwa sonst im ganzen Leiterkreise des Galvanometers vorkommende Berührungsstellen auf konstanter Temperatur gehalten werden. Ebenso ist Lot bei a zur gesicherten Verbindung von L_1 und L_2 einflußlos; man bezeichnet daher die wirksame Berührungsstelle im Thermoelement auch oft als „Lötstelle“, ohne auf das Lot einzugehen. Hat dann a dieselbe Temperatur wie die übrigen Berührungsstellen, so kann kein Strom vorhanden sein (137); das Galvanometer zeigt Null. Die Untersuchung des Thermoelements besteht dann darin, daß man a auf verschiedene, gemessene Temperaturen bringt und die zugehörigen Ströme am Galvanometer mißt. Aus der Kenntnis des Gesamtwiderstandes des Kreises sind dann auch die Thermokräfte nach Ohms Gesetz berechenbar. Es zeigt sich, daß diese Kräfte innerhalb nicht zu großer Temperaturstufen nahe proportional den sie verursachenden Temperaturunterschieden zwischen a und den anderen Berührungsstellen sind. Verschiedene Leiterpaare geben verschieden starke Kräfte bei gleichem Temperaturunterschied; am stärksten wirken unter den nicht zu schlechten Leitern Wismut und Antimon, wobei der Strom an der warmen Stelle vom ersteren zu letzterem geht. Die Kräfte sind immer klein; selbst Wismut mit Antimon gibt für 100° Temperaturunterschied nur 0·01 Volt.

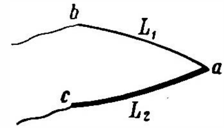


Abb. 113. Thermoelement.

Die Verbindung mehrerer Thermoelemente wird „Thermosäule“ genannt. Die elektromotorischen Kräfte addieren sich hier bei richtiger Verbindung, wie in Abb. 114; alle Lötstellen a sind dann auf der einen, z. B. erhöhten Temperatur zu halten, alle Lötstellen b auf der anderen, z. B. Zimmertemperatur.

225. Die thermoelektrische Wirkung bedeutet, daß die durch Voltas Spannungsreihe (136) gegebenen Spannungen einander berührender Leiter, somit die Abstände der Leiter in der Reihe, von der Temperatur abhängig sind. Die Thermokräfte sind Folgen der Änderungen dieser Berührungsspannungen bei gegebener Temperaturänderung. So schwierig also die Spannungen an sich einwandfrei zu messen sind (vgl. die Note zu 131), so leicht sind deren Änderungen mittels der Thermoelemente in der angegebenen Weise zu beobachten. Daß diese Änderungen, die Thermokräfte, immer nur klein sind, ist nicht zu verwundern, da die Berührungsspannungen der Leiter I. Klasse überhaupt nur klein sind (131).

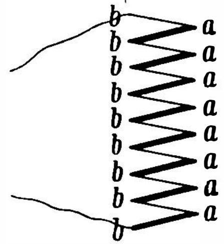


Abb. 114. Thermosäule.

Die Temperaturabhängigkeit der Stellungen der Leiter in der Spannungsreihe hat auch die Wirkung, daß an den Enden eines Drahtes, auch aus einheitlichem Metall, Spannung auftritt, wenn er Temperaturgefälle

hat („Thomson-Effekt"); es berühren sich in seiner Länge Leiter von verschiedener Stellung in der Spannungsreihe. Man sieht daraus aber, daß bei allen Beobachtungen an Thermoelementen stets die Änderungen der Berührungsspannungen an den Grenzen der verschiedenen Leiter zusammenwirken mit den längs jedes einzelnen Leiters auftretenden Spannungen. Es ergibt sich im Allgemeinen eine verwickelte Abhängigkeit der beobachtbaren Gesamtwirkung von den Temperaturen der Berührungsstellen. In manchen Fällen treten sogar Umkehrpunkte der Wirkung auf. Man beobachtet dies z. B. an einem Thermoelement aus Kupfer und Eisen. Erhitzt man seine Lötstelle, so erhält man zuerst einen mit steigender Temperatur steigenden Strom in der Richtung vom Kupfer ins Eisen, der aber dann wieder abnimmt und bei etwa 280°C sogar Null wird, um bei noch weiter steigender Temperatur die entgegengesetzte Richtung anzunehmen und in dieser dann zu steigen.

226. Anwendungen zu Temperaturmessung und Strahlungsmessung. — Thermoelemente sind sehr geeignet als Temperaturmesser mit Fernanzeige; man kann das zugehörige Galvanometer in Temperaturgraden eichen. Sie haben außerdem den Vorteil sehr kleinen Wasserwertes (W 50) der Lötstelle und der Drähte, also sehr schnellen Folgens bei Temperaturschwankungen, und der Anwendbarkeit bei sehr hohen wie auch bei sehr tiefen Temperaturen. Für mittlere Temperaturlage ist Eisen mit Konstantan (169) geeignet; für höchste Temperaturen, bis zum Schmelzpunkt des Platins, Platin mit Platin-Rhodiumlegierung; für tiefste Temperaturen Gold mit Silber. Elemente mit Umkehrpunkten im zu messenden Temperaturbereich, wie das erwähnte mit Eisen und Kupfer (225), wären unbrauchbar. Die Eichung muß stets auf das Luftthermometer (W 36) oder auf Strahlungsmessung (W 183) sich gründen wie beim elektrischen Widerstandsthermometer (169), das auch dieselben Anwendungsmöglichkeiten bietet (W 44).

Thermosäulen aus Wismut und Antimon können zusammen mit guten Galvanometern so empfindlich gemacht werden, daß sie Temperaturunterschiede von Tausendtel Graden sehr leicht anzeigen. Daher sind sie auch zu Strahlungsmessung sehr geeignet, wenn die Gesamtheit der Lötstellen der einen Seite, z. B. a in Abb. 114, zur Absorption der betreffenden Strahlung und also zur Erwärmung durch deren Energie eingerichtet wird. So kann z. B. Ultrarot vortrefflich gemessen werden. Es werden dazu sämtliche Stäbe der beiden Metalle in ihrer Länge isolierend getrennt, doch möglichst dicht gelagert, so daß alle Lötstellen a in eine kleine, zu schwärzende Fläche kommen, die die Strahlung zu empfangen hat. Die Fläche der anderen Lötstellen b muß Zimmertemperatur behalten. Die Empfindlichkeit kann von gleicher Größenordnung sein wie die des Bolometers (169).

227. Thermoelemente als Stromquellen; Übereinstimmung mit dem Energiegesetz. — Die thermoelektrische Wirkung bedeutet eine neue Stromquelle. Die elektrische Energie wird hier nicht aus mechanischer Arbeit genommen wie bei der Reib- und Influenzmaschine oder den Induktionsmaschinen (373 u. f.), auch nicht aus chemischer Energie, wie in Voltas Elementen, sondern offenbar aus Wärme. Es muß dann aber, nach dem Energiegesetz, nicht nur der Temperaturunterschied der Berührungsstellen erforderlich sein,

sondern es muß im stromliefernden Thermoelement Wärme verschwinden, und dieses Verschwinden muß unzertrennlich und im richtigen Maße verbunden sein mit der Stromlieferung. Dies trifft auch zu, wie das Folgende zeigt.

Leitet man durch ein Thermoelement von außen her Strom in der Richtung, in welcher das Element ihn bei Erwärmung seiner Lötstelle liefert, so verschwindet Wärme in der Lötstelle; sie wird kalt. Leitet man den Strom in der entgegengesetzten Richtung durch das Element, so wird die Lötstelle warm. Diese Wirkungen sind unabhängig von der durch die Widerstände bedingten Stromwärmeentwickelung (213); sie lagern sich über dieselbe; sie sind auch proportional der ersten Potenz der Stromstärke, wie schon ihre Umkehr mit der Stromrichtung zeigt (Peltier 1834). Es ist also kein Zweifel, daß der Strom, welchen das Element selbst liefert, seine warme Lötstelle kühlt, so daß dort nicht nur gegen Wärmeverluste an die Umgebung und durch Ableitung an die kälteren Lötstellen die hohe Temperatur erhalten werden muß, wie bei offenem Stromkreis, sondern daß bei Stromschluß noch eine besondere Nachlieferung von Wärme als Äquivalent für die dann verfügbare Stromarbeit notwendig ist.

Die Tatsache der besonderen Kälte- bzw. Wärme-Entwickelung an den Berührungsstellen zweier Metalle kann einwandfrei mit der in Abb. 115 dar- dargestellten Vorrichtung gezeigt werden. Ein Antimonstab Sb grenzt an zwei Wismutstäbe Bi, und die beiden Berührungsstellen sind in je einem Luftgefäß eingeschlossen. Zwischen den Luftgefäßen befindet sich ein Flüssigkeitsrohr. Steht in demselben anfänglich die Flüssigkeit auf beiden Seiten gleich hoch, so tritt beim Einleiten von Strom in der Pfeilrichtung der in der Abbildung ersichtliche Druckunterschied in zunehmendem Maße ein, herrührend von der Erkaltung an der linken und von der Erwärmung an der rechten Berührungsstelle. Stromumkehr kehrt auch den Druckunterschied um; es wird immer diejenige Berührungsstelle kalt, an welcher der Strom vom Wismut zum Antimon, d. i. in derjenigen Richtung geht, in welcher er bei Erwärmung der Berührungsstelle zustande käme. Die gewöhnliche Stromwärme ist bei diesem Versuche unwirksam, weil sie wegen des gleichen Stromes und der gleichen Widerstände auf beiden Seiten gleich ist.

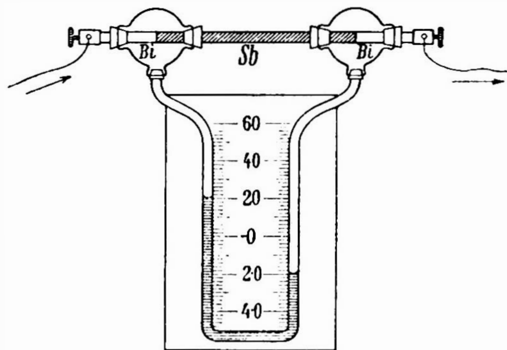


Abb. 115. Peltier-Effekt.

In anderer, sehr einfacher Weise zeigt sich die Kälte- und Wärmewirkung an Berührungsstellen, wenn man Strom durch eine Thermosäule schickt, dann die Stromquelle entfernt und dafür ein Galvanometer an die Thermosäule schaltet. Die Thermosäule liefert dann einen Rückstrom, der am Galvanometer ersichtlich wird. Sie verhält sich also wie eine Kleistsche Flasche oder wie ein Akkumulator; sie wird geladen und entlädt sich dann wieder. Es ist aber bei der Thermosäule nicht elektrische Energie, noch chemische Energie, die aufgespeichert wird, sondern es ist der Temperaturunterschied ihrer beiden Lötstellenseiten, also verfügbare Wärmeenergie

das Wirksame in ihrem „geladenen“ oder „polarisierten“ Zustand. Derselbe ist dementsprechend auch wenig haltbar, da der Temperaturunterschied bald durch Leitung verloren geht.

Die erläuterte Möglichkeit, aus dem Energiegesetz auf die Notwendigkeit der besonderen Kältewirkung elektrischer Ströme zu schließen, ist eines der vielen Beispiele der quantitativen Schlußmöglichkeiten aus dem Energiegesetz trotz vorhandener Unkenntnis der Einzelvorgänge.

Quantitativ verlangt das Energiegesetz, daß die in einer stromliefernden Thermosäule insgesamt verschwindende Wärmemenge, gerechnet in Watt (216), gleich sei dem Produkt aus der Stromstärke und der Spannung der Säule, und dies haben Messungen auch bestätigt. Die hiernach bestehende Ungleichheit der Kältewirkung an den Lötstellen der einen Seite und der Wärmewirkung an der anderen Seite entspricht der für die Stromlieferung nötigen Ungleichheit der Temperaturen der beiden Seiten.

228. Thermosäule und zweiter Hauptsatz der Thermodynamik. — Eine Thermosäule, deren Strom einen Elektromotor treibt, befindet sich in vollständiger Analogie zu einer Dampfmaschine; beides sind Vorrichtungen zur Verwandlung von Wärme in mechanische Arbeit. Die geheizte Lötstellenseite der Säule ist analog dem Kessel der Dampfmaschine, die andere Seite, die zu dauernder Wirkung gekühlt werden muß, ist analog dem Kondensator. Dem Kessel muß mehr Wärme zugeführt werden, als im Kondensator abgegeben wird; der Unterschied wird in Arbeit verwandelt (W 246, 247). Man sieht, daß auch bei Benutzung von Thermosäulen die für alle Wärmemotoren bewährte Unmöglichkeit gilt (W 247), Wärme fortlaufend in Arbeit zu verwandeln, ohne daß ein Teil der Wärme unverwandelt von einem wärmeren zu einem kälteren Körper übergeht. Es gelten hier auch alle für die Dampfmaschine durchgeführten Überlegungen, den Wirkungsgrad betreffend (W 252, 253), d. h. es gilt der zweite Hauptsatz der Wärmetheorie mit seinen Schlußmöglichkeiten (W 255) auch für die Thermosäule. Die obere Grenze ihres Wirkungsgrades ist demnach auch hier durch die benutzten Temperaturen gegeben.

Volle Erreichung der Grenze des Wirkungsgrades würde vollkommene Umkehrbarkeit verlangen (W 248, 250). Die Umkehrbarkeit der bisherigen Thermosäulen ist aber sehr unvollkommen, und dementsprechend ist der Wirkungsgrad gering. Nichtumkehrbar (vgl. W 249) ist nämlich der Abfluß von Wärme infolge von Leitung von der warmen zur kalten Seite der Säule, und dieser Abfluß wird immer groß sein müssen, solange die Säule aus guten Elektrizitätsleitern bestehen soll, die auch entsprechend gute Wärmeleiter sind (W 142). Daher keine Anwendung der Thermosäulen als Quellen starker Ströme.

ANHANG

Anhang E I (zu E 151, 262 u. f., 289 u. f.). Zur Benennung der elektrischen Stromeinheit[1]).

Wir gebrauchen für die Stromeinheit den Namen „Weber“ ebensogut wie „Ampère“. Der Anlaß liegt in der starken Empfindung des historischen Unrechts, welches mit der Übergehung von Wilhelm Weber bei der Namengebung der heute gebräuchlichen elektrischen Einheiten geschehen ist[2]). Wilhelm Weber ist — zusammen mit Gauß — der Begründer des absoluten elektromagnetischen Maßsystems (264 u. f.), dem diese Einheiten sämtlich angehören; er hat außerdem die Methoden und die Instrumente geschaffen bzw. durchgebildet, die zur Verwirklichung der Einheiten gedient haben (Tangentenbussole, Elektrodynamometer, Erdinduktor), und er hat auch die ersten Messungen zu dieser Verwirklichung durchgeführt (289, 290, 292—294, 327, 352). Er hat damit die Grundlagen nicht nur zur Wahl und Verwirklichung der Stromeinheit, sondern auch der übrigen elektrischen Einheiten gegeben. Die Stromeinheit im besonderen lag auf Grund seiner Arbeiten sogar fertig vor, bis auf die Wahl der Zehnerpotenz und des Namens, und ungefähr ebenso auch die Spannungs- und Widerstandseinheit (353, 354). Bemerkenswert ist außerdem, daß alles, was sonst noch an Bausteinen zur Festlegung und praktischen Verwirklichung des Einheitssystems nötig war, ebenfalls aus Deutschland stammte. Ohm hatte den Begriff des Widerstandes eingeführt und sein Gesetz dazu gegeben (156, 157); Siemens hatte mit seiner Quecksilbereinheit das Richtige für die praktische Festlegung der Widerstandseinheit geliefert (159, 354); Friedrich Kohlrausch hatte die von Weber begründete Stromeinheit mittels des Silbervoltameters zuerst exakt festgelegt (293)[3]).

Bei diesem Stand der Dinge hat es bei Einberufung des Pariser Einheitenkongresses von vornherein klar sein können, daß Deutschland der gebende Teil sein werde, und daß also, falls auch andere Nationen gleichmäßig am Endeffekt beteiligt erscheinen sollten, Deutschland würde opfern müssen, wenn nicht ein Ausweg dagegen gefunden wird. Ob das Opfer damals nötig war, um allgemeine Einigung auf bestimmte Einheiten und deren Namen zu sichern, und ob nicht der Ausweg darin hätte bestehen können, daß Deutschland die Sache von vornherein mehr selbständig in die Hand genommen hätte, kann jetzt fraglich bleiben. Unzweifelhaft aber ist es, daß das Opfer, welches ganz vorwiegend Wilhelm Weber betroffen hat, nicht dauernd wie ein Unrecht auf uns lasten bleiben darf. Der von uns hier nachträglich eingeschlagene Ausweg ist frei von Nachteilen. Er ändert nichts an der Einheit selbst, er läßt auch ihren Namen — „Ampère“ —

[1]) Zuerst veröffentlicht in der „Elektrotechnischen Zeitschrift“ 1919, Heft 10.

[2]) Vgl. die historischen Daten am Fuße der Tab. 51 Bd. IV. Der größte Teil der hier in Betracht kommenden, Wilhelm Weber zu dankenden grundlegenden Forschungen wird im IV. Bande behandelt; wir bringen diesen Anhang aber schon hier, weil wir die absoluten und die technischen Einheiten samt ihren Namen schon mit Beginn der Elektrizitätslehre, in diesem Bande, eingeführt haben.

[3]) Kohlrauschs untereinander gut übereinstimmende Zahlen für die Silberabscheidung durch die Stromeinheit würden, für sich allein genommen, schon genau die heutige Festhaltung der Stromeinheit ergeben haben, während die von anderen Seiten gelieferten Zahlen (Mascart in Frankreich und Rayleigh in England) keineswegs die genügende Genauigkeit besaßen, wie die späteren Messungen gezeigt haben.

bestehen, übersetzt ihn nur gewissermaßen ins Deutsche — „Weber" — und bietet so jedem Deutschen Mittel und Gelegenheit, zu zeigen, daß er es nicht für richtig hält, wenn eine Nation das Andenken eines ihrer Besten mindert, um damit internationale Ziele zu erstreben. Der Gebrauch der Namen Ampère und Weber nebeneinander für Einunddasselbe kann in keiner Weise hinderlich oder gar verwirrend wirken, nicht mehr als der gleichbedeutende Gebrauch von „courant", „current", „Strom" usw., der nicht aufhören wird, und der Jedem nur selbstverständlich erscheinen wird, solange die Menschheit tatsächlich noch aus verschiedenen Völkern besteht.

